

JE CRAQUE POUR LE CIMENT

Laurence Allard et Mathis Lavoie

ABSTRACT

Since both of us are going to university in civil engineering we want our project to contain engineering concepts to initiate ourselves in this area. In first place, we thought about building a bridge, but we see that too many people have already done this project before us. The goal of this project is to study the chemical and physical properties of cement. The hypothesis are that concrete beams who had 3 week of reaction are going to be more resistant than beams who had 1 or 2 weeks of drying. Also, a concrete beam who has a frame at any place in it will be more resistant than one that got nothing inside. Achieve this project was not as easy has we expected. We soon realised that cement was a lot harder to break than we could think of. We had to think of a system that would multiply the force on the beams without require a lot of equipment. The system we found was built so that if we put 1 kg, the pulley will multiply by 16 the mass on the beam. This technique allowed us to break all our 82 cement beams. Then, we cumulate the results of our tests and analyse them. The first hypothesis turns out to be true, but the second hypothesis can't be confirmed because the results we obtained. To conclude, this project demonstrates a lot about cements physics and what to expect in our next four year of study.

MOTS CLÉS : Ingénierie, physique mécanique, béton, structure, lois de Newton

INTRODUCTION

Le choix des matériaux est très important quand vient le temps de construire une structure quelconque. Les matériaux ne répondent pas de la même façon sous diverses contraintes. Ils sont donc choisis selon différentes variables, comme le climat ou la fréquence d'utilisation de la structure. Le béton a certains atouts bien distincts expliquant son importance dans le domaine de la construction. Entre autres, il possède une grande durabilité dans le temps ainsi qu'une importante résistance au feu, à la rouille et aux moisissures. Cependant, la production du ciment, qui est un composant du béton, demande un énorme apport en électricité et en dérivé de pétrole ce qui génère une grande émission de gaz à effet de

serre et de polluants dans l'atmosphère. De plus, le béton est un matériau qui manque de souplesse ce qui peut être très problématique lorsqu'il est soumis à de fortes vibrations comme les séismes et le passage de véhicule lourds. Dans notre région par exemple, il existe énormément de chemins forestiers et cela fait en sorte que de gros camions chargés de bois ou de minerai passent régulièrement sur des ponts. Ceux-ci doivent donc résister à d'importantes charges et ne doivent pas nécessiter un entretien fréquent, car ils sont en grande quantité et sont souvent à de grandes distances de la ville la plus proche. En ce sens, il est essentiel d'optimiser les structures de béton afin qu'elles soient plus résistantes aux contraintes environnementales et humaines. Cela mène aux hypothèses :

- Une poutrelle de béton, après une période de solidarisation de trois semaines, est plus résistante qu'une même poutrelle après une solidarisation de deux semaines et une semaine.
- Une poutrelle de béton avec une armature, peu importe sa position dans la poutrelle, est plus résistante qu'une poutrelle sans armature.

Chimie du béton :

Contrairement à la croyance populaire, le béton ne sèche pas, mais il durcit à la suite d'une série de réactions chimiques qui se poursuivent au-delà de 28 jours comme illustrée sur le graphique de la figure 1 (internet 2). Ce processus s'appelle la solidarisation. C'est le ciment qui maintient les graviers ensemble et qui initie les réactions chimiques présentées dans l'annexe 1. Ce dernier est constitué de plusieurs minéraux en différente quantité également présentés dans l'annexe 1.

La solidarisation du béton se sépare en trois principaux stades illustrés dans la figure 2. La réaction d'hydratation est une importante réaction qui survient pendant la phase dormante, mais également pendant la prise du béton. Lors de cette réaction, l'eau réagit avec l'oxyde de calcium pour rapidement prendre un hydrogène et former de l'hydroxyde de calcium selon l'équation : $H_2O + CaO \rightarrow CaOH + OH^-$.

Le gypse présent dans le mélange agit comme catalyseur pour éviter une prise trop rapide. De plus, dû à la présence d'ions OH^- , la solution ionique est très basique. Ensuite, les ions commencent à se réassembler en quelques minutes pour former l'ettringite ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$).

Le stade de dormance est caractérisé par des réactions chimiques imperceptibles à l'œil nu au cours desquelles le béton reste malléable.

Entre autres, le silicate bi-calcique et tricalcique déshydrate l'ettringite formant des monosulfoaluminates de calcium qui réagissent entre eux pour former la portlandite ($Ca(OH)_2$).

La prise correspond à l'accélération des réactions d'hydratation et est caractérisée par une augmentation de la viscosité soit une diminution de l'écoulement de la solution. Elle se termine au moment où la solution n'est plus malléable. Au cours de ce stade, les cristaux de portlandite s'unissent avec les grains de ciment ce qui forme des ponts d'hydrates qui vont relier les grains ensemble.

Le dernier stade est le durcissement. Il est caractérisé par la cristallisation des ions et autres éléments présents qui forme une structure très solide. Une fois coulé, le béton nécessite un minimum de 100 heures pour durcir complètement (Internet 4).

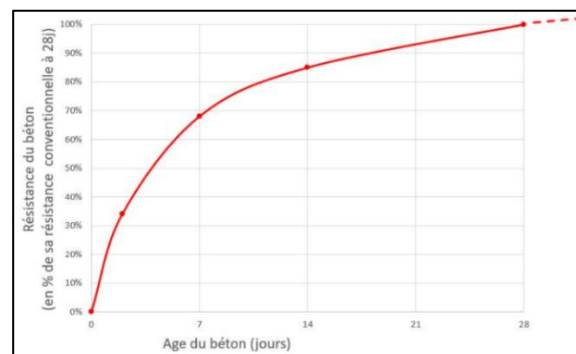


Figure 1 : Évolution de la résistance du béton en fonction du nombre de jours de séchage. (Adapté de Béton direct, 2022)

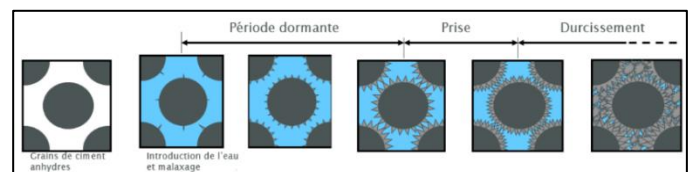


Figure 2 : Différents stades de solidarisation des grains de ciment. (Adapté de Béton direct, 2022)

Résistance en compression et tension :

La théorie suivante a été élaborée à partir de Blanc, A. (2022). Lorsqu'une force est appliquée sur une poutre, cette dernière va se déformer en fonction de la valeur de la force ainsi que l'endroit où cette force est appliquée sur la poutre, de la façon dont la poutre est appuyée et en fonction des liens de la poutre avec le reste de la structure. La poutre déformée subit des contraintes, exprimées en Pascal (Pa), de compressions dans la partie supérieure et de tensions dans la partie inférieure. L'axe central de la poutre ne subit aucune contrainte. La figure 3 représente les différentes contraintes d'une poutre déformée appuyées aux extrémités et subissant une force en son centre.

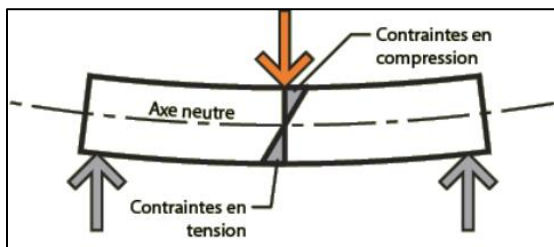


Figure 3 : Les contraintes sur une poutre déformée par une force. (Blanc, A (2022))

Si le béton est connu pour sa grande résistance en compression (30 MPa), son point faible est plutôt la tension. Pour pallier cet inconvénient, une armature en acier ou autre matériau résistant à la tension est ajoutée au béton afin de le renforcer. Cet ajout permet au béton armé de stabiliser les structures et de soutenir des charges plus lourdes (Ramier, S. 2020). Comme démontré dans la figure 3, la poutre subit de la tension dans la région située sous l'axe central. Il serait donc logique d'ajouter une armature dans cette région pour optimiser la résistance de la poutre.

À partir de la figure 3, il est possible de déterminer la contrainte (σ) qui varie selon l'équation : $\sigma = \frac{M_f}{I} \times v$.

L'utilité de cette contrainte est que tant qu'elle est inférieure à une valeur critique (déterminé par le matériel), la poutre ne se brisera pas. Le moment de flexion (M_f), exprimé en Newton • mètre (Nm), montre comment la force est répartie sur la poutre. Dans le cas présent, la force est concentrée en un point au centre de la poutre ce qui permet d'exprimer le moment de flexion par la figure 4.

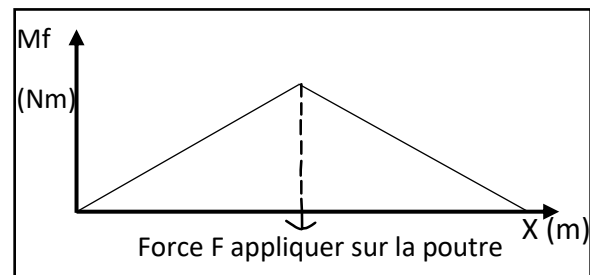


Figure 4 : Moment de flexion d'une poutre en fonction de la position sur la poutre.

Le symbole I correspond au moment d'inertie de la poutre qui se calcule à partir de l'équation : $I = \frac{b \times h^3}{12}$ Où b est la largeur de la base de la poutre et h la hauteur. Cette équation permet d'expliquer pourquoi une poutre verticale est toujours plus forte qu'une poutre horizontale puisque la hauteur est au cube donc plus la hauteur est grande plus le moment d'inertie est élevé donc la contrainte σ diminue.

Finalement, v correspond à la distance entre l'axe central et l'endroit sur la poutre où la contrainte est calculée. La contrainte est maximale aux extrémités et minimale en son centre. Cette théorie explique également pourquoi les poutrelles en I sont si efficaces, car le centre de la poutre n'a pas besoin d'être large puisqu'il ne subit aucune contrainte.

Système de poulies :

Le système de poulies représenté à la figure 6 est composé d'un cadre en bois, de corde en métal, d'une plaque en bois et de 4 poulies. Ce montage met en relation les lois de Newton ainsi que la théorie sur les systèmes de poulies ce qui permet de multiplier par 16 la masse appliquée sur le plateau. En effet, la somme des forces sur la poulie A dont le schéma des forces est représenté à la figure 5 démontre que la force de tension sur la corde T2 correspond au double de la force appliquée sur la corde T1. Comme la force de tension dans la corde 1 équivaut au poids placé sur la planche de bois et que pour chaque poulie, le poids appliqué sur la plaque double, la force subit par la poutre de béton pour un système à quatre poulies correspond à 16 fois le poids appliqué sur la plaque.

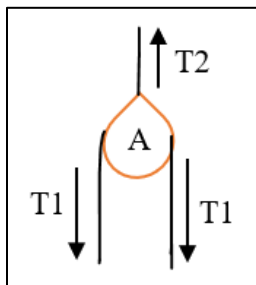


Figure 5 : Schéma des forces sur la poulie A.

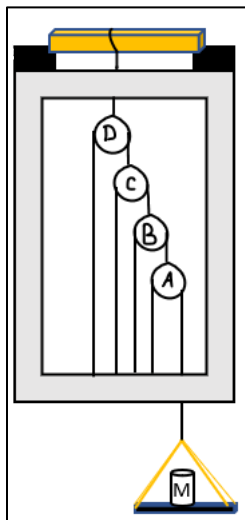


Figure 6 : Montage du système de poulie.

La poutre inférieure du cadre de bois subit la somme des forces dans chacune des cordes. C'est pourquoi il est essentiel qu'elle soit grosse pour qu'elle puisse supporter cette force sans se briser.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

La première étape était de fabriquer le cadre en bois dans lequel serait coulé le béton. Pour ce faire, le modèle représenté dans la figure 7 a été suivi. Faisant un total de 82 compartiments de 3,8 cm de largeur, 7,6 cm de hauteur et 61,0 cm de longueur.

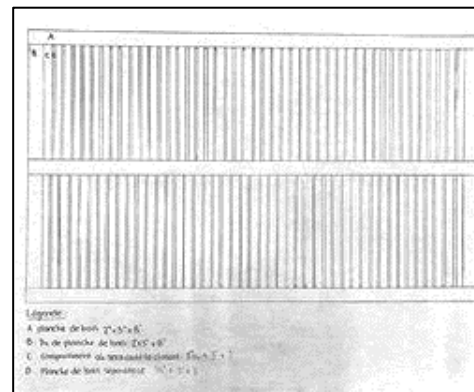


Figure 7 : Plan du cadre de bois.

Ensuite, neuf poches de 30 kg de ciment-sable prémélangé Bomix ont été utilisées afin de remplir presque l'intégralité du cadre de bois. Sur les 82 poutres, 47 n'avaient pas d'armature, 14 avaient une armature dans le bas, 14 autres avaient une armature dans le haut et les 7 dernières avaient une armature au milieu. De plus, pour les poutres avec armature en haut et en bas, une moitié étaient positionnées horizontalement et l'autre moitié était positionnée verticalement lors des tests. Afin de faciliter la tâche, un schéma indiquant l'emplacement et le nombre de poutres selon leur caractéristique a été réalisé. L'armature utilisée dans les poutres était un grillage métallique avec des carrés de 6,4 mm de longueur. Pour respecter la première hypothèse, les premiers essais ont

été effectués exactement une semaine après le coulage du béton. Le système utilisé pour briser les poutres consistait à déposer la poutre sur un support en métal puis à y suspendre une chaudière de 16 L dans laquelle serait versée de l'eau jusqu'à ce que la poutre cède. Le premier problème rencontré fut que trois chaudières de 16 L suffisaient à peine à venir à bout des poutres horizontales après une semaine de solidarisation qui était théoriquement les poutres les plus faibles.

Un nouveau système a donc été élaboré, soit un système de palan à quatre poulies représenté à la figure 8. La poutre était déposée au sommet du cadre de bois et une corde reliée au système de poulies y était accrochée. Comme expliqué dans la théorie du système de poulies, la force subie par la poutre correspond à 16 fois le poids appliqué sur la plaque. Pour tester la résistance des poutres, il a donc suffi d'augmenter le poids sur la plaque jusqu'à ce que la poutre cède.

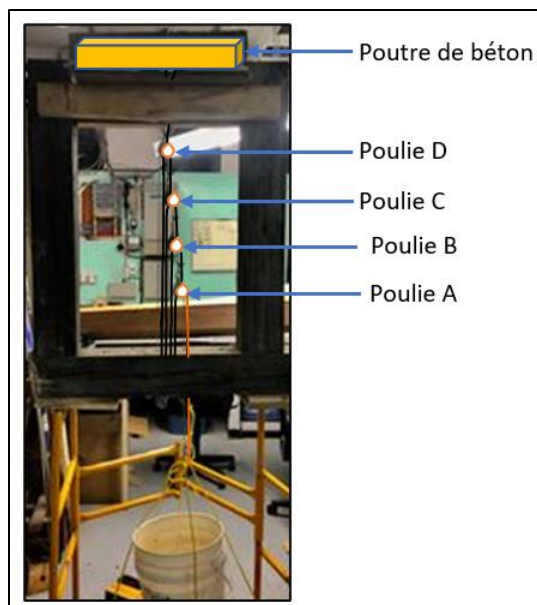


Figure 8 : Montage avec système de poulies.

Lors de la première semaine d'expérimentation, six poutres horizontales sans armature ont été testées. Lors de la deuxième semaine d'expérimentation, six

poutres verticales et six poutres horizontales sans armature ont été testées. Lors des semaines 3, 4 et 5, 2 poutres horizontales sans armature, 2 poutres verticales sans armature, 2 poutres horizontales avec armature dans le bas, 2 poutres horizontales avec armature dans le haut, 2 poutres verticales avec armature au milieu, 2 poutres verticales avec armature dans le bas et 2 poutres verticales avec armature dans le haut ont été testées. Pour chaque poutre, la masse au moment où elles cassaient a été prise en note puis cumulée dans Excel sous forme de tableau. Ces données sont également présentées dans l'annexe 2. La moyenne, l'écart-type, l'intervalle de confiance et des tests d'hypothèse ont été faits pour comparer tous les types de poutres afin de vérifier les hypothèses.

RÉSULTATS

Pour la première hypothèse, six poutres horizontales sans armature par semaine ont été testées lors des trois premières semaines d'expérimentation et six poutres verticales sans armature ont été testées lors de la deuxième et troisième semaine d'expérimentation. Le tableau 1 présente les moyennes, écarts-types et intervalles de confiances obtenus lors des tests faits aux semaines un, deux et trois pour les poutres horizontales sans armature. Le tableau 2 expose le résultat du test d'hypothèse fait sur les moyennes des poutres horizontales sans armature des semaines deux et trois.

Tableau 1 : Résultats des essais sur les poutres horizontales sans armatures pour les trois premières semaines.

Semaine	Moyenne (kg)	Écart-type (kg)	Intervalle de confiance (kg)
1	39	11	[30 ; 48]
2	75	10	[66 ; 83]
3	70	3	[58 ; 83]

Tableau 2 : Test d'hypothèse des moyennes de la semaine deux et trois des poutres horizontales sans armature à 5 % de marche d'erreur.

$t_{m+n-1;\alpha/2}$	1,943
$t_{\text{observé}}$	-0,665

Le tableau 3 contient les résultats des essais effectués sur les poutres verticales sans armature lors des semaines deux et trois. Il présente les moyennes, écarts-types et intervalles de confiances obtenus. Le tableau 4 révèle le résultat du test d'hypothèse fait sur les moyennes des poutres verticales sans armature des semaines deux et trois.

Tableau 3 : Résultats des essais sur les poutres verticales sans armatures pour la deuxième et la troisième semaine.

Semaine	Moyenne (kg)	Écart-type (kg)	Intervalle de confiance (kg)
2	117	49	[74 ;157]
3	198	36	[36;359,7]

Tableau 4 : Test d'hypothèse des moyennes de la semaine deux et trois des poutres verticales sans armature à 5 % de marche d'erreur.

$t_{m+n-1;\alpha/2}$	1,943
$t_{\text{observé}}$	2,107

Pour la seconde hypothèse, les tableaux 5 et 6 contiennent l'information des poutres verticales et horizontales avec et sans armature testées lors des semaines 3, 4 et 5.

Tableau 5 : Comparaison de la résistance des poutres horizontales avec et sans armature.

	Moyenne (kg)	Écart-type (kg)	Intervalle de confiance (kg)
Sans armature	60,5	14	[49 ; 72]
Armature bas	95,5	8	[89 ; 102]
Armature haut	85	14	[73 ; 96]

Tableau 6 : Comparaison de la résistance des poutres verticales avec et sans armatures.

	Moyenne (kg)	Écart-type (kg)	Intervalle de confiance (kg)
Sans armature	154	41	[120 ;188]
Armature bas	132	43	[97 ; 167]
Armature milieu	122	35	[94 ; 151]
Armature haut	141	32	[115 ;167]

Tableau 7 : Test d'hypothèse des moyennes des poutres verticales sans armature et des poutres verticales avec une armature à 5 % de marche d'erreur.

Armature	En haut	Milieu	En bas
$t_{m+n-1;\alpha/2}$	1,812	1,812	1,833
$t_{\text{observé}}$	0,612	1,45	-0,96

DISCUSSION

Pour vérifier la première hypothèse, à partir du tableau 1, il a été observé que les poutres horizontales sans armatures testées lors de la première semaine sont significativement

moins résistantes que celles des semaines 2 et 3 (voir intervalle de confiance du tableau 1).

Cependant, comme les intervalles de confiances des poutres des semaines 2 et 3 se chevauchent, un test d'hypothèse a dû être effectué afin de déterminer si les poutres de la semaine trois étaient ou non plus résistantes que celles de la semaine deux. Le calcul réalisé est un test d'hypothèse sur deux moyennes indépendantes, qui suit l'équation : $t_{obs} = \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_1}{s_p \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{m}}}$.

Un exemple de ce calcul est décrit dans l'annexe 5. Le tableau 2 présente les résultats de ce test d'hypothèse. Comme $t_{observé}$ est plus petit que $t_{m+n-1:\alpha/2}$, il a été conclu que les poutres horizontales sans armatures à trois semaines de cure n'étaient pas significativement plus résistantes que celles à deux semaines de cure.

Le tableau 3 contient les résultats pour les poutres verticales sans armatures. Afin d'affirmer que les poutres de la semaine 3 sont significativement plus résistantes que les poutres avec deux semaines de maturation, un même test d'hypothèse a été effectué. Les résultats du test, présenté dans le tableau 4, ont permis d'affirmer qu'il y a une différence significative entre les deux semaines. Il n'y a pas eu de test la semaine 1 car le système avec seulement des chaudières n'était pas efficace pour casser le béton.

Comme les poutres verticales de 3 semaines sont plus résistantes que les poutres verticales deux semaines, la première hypothèse est confirmée pour les poutres verticales. Cependant, l'hypothèse ne peut être confirmée pour les poutres horizontales étant donné que l'écart entre les poutres des semaines 2 et 3 n'est pas suffisamment grand, mais l'écart est significatif entre la semaine 1 et 2.

L'hypothèse 2 est confirmée pour les poutres horizontales à partir du tableau 5 puisque l'intervalle de confiance des poutres sans armature est inférieur à ceux des poutres avec armature.

Cependant, le tableau 6 n'est pas aussi concluant puisque les intervalles de confiances se chevauchent. Des tests d'hypothèse ont dû être effectués en suivant la même méthode que précédemment et dont les résultats sont exposés dans le tableau 7. Ces calculs ont permis d'infirmer la seconde hypothèse pour les poutres verticales puisque pour tous les tests d'hypothèse, la valeur de $t_{observé}$ est plus petite que $t_{m+n-1:\alpha/2}$, donc les poutres verticales avec armature ne sont pas significativement plus résistante que les poutres sans armature.

CONCLUSION

Pour conclure, de nombreux concepts de statistique, de physique et de chimie ont été utilisés dans la réalisation du projet. La statistique a permis de confirmer et d'infirmer nos hypothèses de départ à l'aide de calculs comprenant la moyenne, l'écart-type ainsi que de test d'hypothèse. La chimie a été utilisée pour expliquer nos résultats ou encore permettre de comprendre certains concepts avec le béton. La partie physique pour améliorer notre système ou encore comprendre certaines parties de notre projet.

Malgré le bon déroulement du projet, la limite de temps a empêché de faire plus d'essais et ainsi utiliser la formule de la loi normale pour des résultats plus représentatifs de la réalité. Le budget représente aussi une limite et sans cette dernière, le projet aurait pu être d'une plus grande envergure.

Lors de l'expérimentation, plusieurs problèmes ont dérangé au bon déroulement du projet. D'abord, notre première hypothèse qui était que le béton ayant réagi pendant une semaine allait être moins résistant que celui ayant réagi pendant trois semaines a été

validée partiellement. Voici une observation qui pourrait expliquer les différents résultats : plusieurs poutres étaient fissurées. Lorsque le béton coulé sur une grande surface, le centre aura tendance à chauffer plus rapidement que les extrémités. En cas de surchauffe, le béton peut se fissurer et affaiblir la structure (Van Neerden, T. (2018)). En étant fissurée, une poutre aura une inertie plus faible $I = \frac{b \times h^3}{12}$ donc la contrainte sigma sera plus grande, donc cassera plus vite.

Ensuite, la deuxième hypothèse qui était que les poutres ayant de l'armature à n'importe quel endroit allaient être plus résistantes que celles sans armature. Le quadrillage des armatures utilisées était trop petit et donc les grains de ciment ne pouvaient pas se cristalliser entre eux au travers de l'armature lors de la phase de durcissement. Cela a donc provoqué des fissures lors de la période de cure. Ces fissures ont impacté les essais, car celles-ci ont annulé l'effet des armatures sur la solidité des poutres de béton (modification du moment d'inertie).

Un autre problème aura été les cordes utilisées lors du premier montage. Celles-ci étant faites en corde tressée, elles étaient trop élastiques et donc causaient un problème lors de la pose des poids sur notre plateforme au bas du système. Dû à ce problème combiné à l'inefficacité du système de chaudière, seules les six poutres horizontales ont pu être testées ce qui explique pourquoi il n'y a que deux semaines de résultats pour les poutres verticales de la première hypothèse. Ensuite, si l'efficacité du système de poulie était incontestable, les cordes ont vite été dépassées. Ces dernières s'étiraient trop dû à la force appliquée et elles nécessitaient toujours un réajustement. Ce qui a mené au système final représenté à la figure 8. Celui-ci était semblable en tout point au précédent cependant, les cordes du système de poulies ont été remplacées par des cordes en métal beaucoup plus résistantes à la tension.

À partir de la formule de contrainte et les mesures des poutres, il devrait avoir un facteur 2 entre la résistance des poutres verticales et horizontales. Selon les tableaux 5 et 6, il y a un rapport de 2,5 entre les moyennes, ce qui est du même ordre de grandeur que la théorie.

Une autre remarque qu'il est possible de faire : l'armature inférieure est plus efficace que l'armature supérieure selon le tableau 5 pour les poutres horizontales. Ce qui concorde avec la théorie qui dit qu'une poutre est en extension dans sa partie inférieure (voir figure 3). Cependant, les essais sur les poutres verticales ne permettent pas de confirmer cette théorie (fissures au niveau de l'armature).

SUGGESTIONS ET PERSPECTIVES D'AVENIR

Dans le cadre du cours de calculs différentiels et intégrales 3, la courbe de l'affaissement d'une poutre de densité uniforme et de forme régulière est décrite par l'équation différentielle : $y^{(4)} = \frac{w}{E \times I}$ qui est une dérivée quatrième. Dans l'avenir, il serait intéressant de vérifier l'affaissement théorique d'une poutre à partir de cette équation. Il serait alors recommandé d'utiliser un matériau moins rigide que le béton afin de pouvoir observer la déformation des poutres avant qu'elles ne cassent.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier M. Jean-Norbert Fournier et M. Jean Bédard, nos co-tuteurs, pour leur aide et soutien tout au long de ce projet, mais également pour les idées qu'ils ont apportées. Également, merci à M. Steve Gamache pour nous avoir guidés durant toute la session ainsi qu'à Mme. Marie Lefrançois pour nous avoir conseillés pendant les périodes d'expérimentation.

Médiagraphie

Internet 1 : Academia. Consulté le 11 mai 2022. *Chapitre II Hydratation des ciments composés* https://www.academia.edu/40327142/CHAPITRE_%D0%86%D0%86_HYDRATATION_DES_CIMENTS_COMPOSES

Internet 2 : Béton direct, tout sur le béton. Consulté le 26 avril 2022. *Prise et durcissement du béton* [https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/prise-et-durcissement-du-beton/#:~:text=La%20mont%C3%A9e%20en%20r%C3%A9sistance%20du,m%C3%A9ga%2Dpascals%20\(MPa\).](https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/prise-et-durcissement-du-beton/#:~:text=La%20mont%C3%A9e%20en%20r%C3%A9sistance%20du,m%C3%A9ga%2Dpascals%20(MPa).)

Internet 3 : Blanc, A. (consulté le 27 avril 2022) STI 2D. *Flexion*. <http://sti2d.stlouis.free.fr/Flexion.html?fbclid=IwAR3e18zzEzwFH1z-Blf14PkWe09zyykYUNLRkb12jVv7dYeZATOL3D2arQ>

Internet 4 : Foulon, J-P. (Consulté le 26 avril 2022) Médiachimie. *Zoom sur la formulation des bétons et des ciments*. <https://www.mediachimie.org/ressource/zoom-sur-la-formulation-des-b%C3%A9tons-et-des-ciments?fbclid=IwAR3WWBL0TCgctlm1LJhQX654FQA2FEDGKdINs4hTeqQTQXJgi3xN0SyPeVU>

Internet 5 : Ramier, S. (2020) Construction & travaux. *Pourquoi le béton armé ?* <https://www.construction-travaux.com/pourquoi-le-beton-arme/>

Internet 6 : Van Neerden, T. (2018) Couleur science. *Comment sèche le béton ?* https://couleur-science.eu/?d=e82364--comment-seche-le-beton&fbclid=IwAR3sTGfhS-f3OD8dEMz0EHiWKJLj_wCsvWxgSvIVD8k9hl_DGyC3YCIe6CE

Annexe 1 : Chimie du ciment

Minéraux composant le ciment et leur proportion dans le mélange. (Béton direct, 2022)

silicate tricalcique	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	de 45 à 79,7 %
silicate bicalcique	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	de 5,7 à 29,8 %
aluminat tricalcique	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	de 1,1 à 14,9 %
aluminoferrite tétracalcique	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	de 2,0 à 16,5 %
gypse	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	de 3 à 5 %

Description des différentes réactions chimiques pendant la prise du béton.

	Réaction	Description
1	Réaction d'hydratation	L'eau réagit avec l'oxyde de calcium pour rapidement prendre un hydrogène et former de l'hydroxyde de calcium. Le gypse présent dans le mélange agit comme catalyseur pour éviter une prise trop rapide. Dû à la présence des ions OH^- , la solution ionique est très basique. Les ions commencent à se réassembler en quelques minutes pour former l'ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) aussi appelée monosulfoaluminate de calcium hydraté. Cette réaction dégage une grande quantité de chaleur.
2	Phase dormante	Le silicate bicalcique et tricalcique déshydrate l'ettringite formant des monosulfoaluminates de calcium $(\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O})$ $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ Qui réagissent entre eux pour former la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) $\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$
3	La prise	Accélération des réactions d'hydratations ce qui donne naissance à des hydrates qui sont l'union de l'eau avec les différents minéraux. Les cristaux de portlandite s'unissent avec les grains de ciment ce qui forme des ponts d'hydrates (internet 1). Cette réaction est très exothermique.
4	Durcissement	Résultat de la cohésion des différents grains de ciment qui s'enchevêtrent avec des ions privés d'eau qui sont retournés à leur forme cristalline. Forme une masse dans laquelle divers cristaux s'enchevêtrent ce qui rend la structure très solide.

Annexe 2 : Résultats des tests

Tableau 11 : Poutres horizontales sans armature après une semaine de cure.

Poutre	Quantité d'eau (L)	Masse totale (kg)
1	48	51,1104
2	16	24,7134
3	26	34,7134
4	26	34,7134
5	36	52,7686
6	22,5	36,1252

Tableau 12 : Poutres horizontales et verticales sans armature après deux semaines de cure.

Horizontales			Verticales		
Poutre	Quantité d'eau (L)	Masse totale (kg)	Poutre	Quantité d'eau (L)	Masse totale (kg)
1	2	73,97088	1	2	73,97088
2	1,5	65,97088	2	9	185,97088
3	1,4	64,37088	3	3	89,97088
4	1,7	69,17088	4	2	73,97088
5	3	89,97088	5	4	105,97088
6	2,65	84,37088	6	8	169,97088

Tableau 13 : Poutres horizontales et verticales sans armature après trois semaines de cure.

Horizontales			Verticales		
Poutre	Masse (kg)	Masse totale (kg)	Poutre	Masse (kg)	Masse totale (kg)
1	1,75	72,47088	1	11,2	223,67088
2	1,5	68,47088	2	8	172,47088

Tableau 14 : Semaine 9, 10, 11, poutres horizontales et verticales sans armature.

	Horizontales			Verticales		
	Poutre	Masse (kg)	Masse totale (kg)	Poutre	Masse (kg)	Masse totale (kg)
Semaine 9	1	1,75	72,47088	1	11,2	223,67088
	2	1,5	68,47088	2	8	172,47088
Semaine 10	1	1,5	51,5	1	7,06068	140,47088
	2	0,5	35,5	2	5	107,5
Semaine 11	1	2,5	67,5	1	8,06068	156,47088
	2	2,5	67,5	2	6,06068	124,47088

Tableau 15 : Semaine 9, 10, 11, poutres horizontales et verticales avec armature en haut.

	Horizontales			Verticales		
	Poutre	Masse (kg)	Masse totale (kg)	Poutre	Masse (kg)	Masse totale (kg)
Semaine 9	1	4,5	99,5	1	8,06068	156,47088
	2	2,5	67,5	2	5,06068	108,47088
Semaine 10	1	3	75,5	1	10,06068	188,47088
	2	4	91,5	2	5	107,5
Semaine 11	1	3	75,5	1	6,5	131,5
	2	4,5	99,5	2	8,06068	156,47088

Tableau 16 : Semaine 9, 10, 11, poutres horizontales et verticales avec armature en bas.

	Horizontales			Verticales		
	Poutre	Masse (kg)	Masse totale (kg)	Poutre	Masse (kg)	Masse totale (kg)
Semaine 9		3,5	83,5	1	10,06068	188,47088
		4,5	99,5	2	5,56068	116,47088
Semaine 10		5	107,5	1	6	123,5
	2	4,5	99,5	2	3	75,5
Semaine 11	1	4	91,5	1	8,06068	156,47088
	2	4	91,5	2	-	-

Tableau 17 : Semaine 9, 10, 11, poutres verticales avec armature au milieu.

	Verticales		
	Poutre	Masse (kg)	Masse totale (kg)
Semaine 9	1	4	91,5
	2	6	123,5
Semaine 10	1	4,5	99,5
	2	4	91,5
Semaine 11	1	9,06068	172,47088
	2	8,06068	156,47088

Annexe 3 : Photos des montages



Figure 9 : Montage semaine 1.



Figure 10 : Montage



Figure 11 : Montage semaine 2.

Annexe 4 : Exemple de calcul d'un test d'hypothèse

Méthode utilisée : Test d'hypothèse sur deux moyennes indépendantes.

On veut montrer que les poutres horizontales sans armature après trois semaines de cure sont plus résistantes que les poutres horizontales sans armature avec deux semaines de cure.

$$H_0 : \mu_{x3} = \mu_{x2}$$

$$H_1 : \mu_{x3} > \mu_{x2}$$

H_1 est confirmé si t_{obs} est plus grand que $t_{n+m-2 : \alpha/2}$

Données :

Semaine 2

Nombre de poutres = $n = 6$

Moyenne = $\bar{x}_1 = 75$

Écart-type = $S_{x1} = 10$

$$t_{n+m-2 : \alpha/2} = 1,943$$

Semaine 3

Nombre de poutres = $m = 2$

Moyenne = $\bar{x}_2 = 70$

Écart-type = $S_{x2} = 3$

$$\text{Équation : } t_{obs} = \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_1}{S_p \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{m}}} = -0,665 \text{ où } S_p = \sqrt{\frac{(n-1)S_{x2}^2 + (m-1)S_{x1}^2}{n+m-2}} = 9,21$$

Comme $-0,665 < 1,943$ on ne peut pas confirmer H_0 donc les poutres horizontales sans armatures à trois semaines de cure ne sont pas significativement plus résistantes que celles à deux semaines de cure.