

Façade végétalisée en béton d'impression 3D

Exploitation pédagogique en pré-bac STI2D AC

Culture Sciences
de l'Ingénieur

Emy CELESCHI - Clément DESODT - Hélène HORSIN MOLINARO

Édité le
14/09/2026

école
normale
supérieure
paris—saclay

Cette ressource est issue du dossier industriel présenté lors du concours de l'agrégation externe SII, spécialité Ingénierie des Constructions, session 2025, d'Emy Celeschi, élève au département Génie Civil et Environnement à l'ENS Paris-Saclay.

Cette ressource propose l'exploitation pédagogique de niveau pré-baccalauréat d'un exemple réel de réalisation d'une paroi en impression 3D béton. Dans un premier temps, la réalisation de la façade en béton par impression 3D est présentée depuis la technique jusqu'au choix de la formulation du béton. Dans un second temps, l'exploitation pédagogique est détaillée pour un niveau STI2D AC depuis les objectifs de la séquence jusqu'au découpage de la séance et passant par certains documents nécessaires à son déroulement.

1 - Choix de l'impression 3D pour la façade végétalisée : un exemple réel

À Choisy-le-Roi dans le département du Val-de-Marne, le Syndicat des eaux d'Île-de-France (Sedif) possède une des trois usines qui assurent production et la distribution d'eau potable pour plus de 4 millions de franciliens. Située sur les bords de Seine, l'usine est insérée dans un tissu urbain dense, au milieu de la ZAC du port, des zones résidentielles d'immeubles ou de pavillons, d'une voie ferrée et du centre technique de la municipalité de Choisy-le-Roi. Le site industriel laisse une parcelle libre dans un angle d'environ 1 hectare [1].

Ce site très industrialisé présente de larges surfaces bétonnées ou bitumées. Les architectes, souhaitant créer un espace où pourrait se développer la biodiversité, ont fait le choix audacieux d'une toiture terrasse ainsi que d'une façade végétalisée construite en impression 3D béton pour le bâtiment de l'usine.



Figure 1 : Future usine de Choisy-le-Roi avec sa façade végétalisée, source [2]

Le choix des architectes de proposer une paroi verticale végétalisée vient du peu d'espaces horizontaux disponibles alors qu'ils souhaitaient créer un espace vert. De leur souhait de rappeler le visuel d'une paroi rocheuse naturelle sur laquelle s'accrocheraient des végétaux, a découlé le choix de la technique d'impression 3D. C'est en effet la seule qui permet d'obtenir des pans de parois aux formes variables, avec différents volumes adaptés aux végétaux et un aspect aléatoire pour rappeler une paroi rocheuse naturelle. Les volumes creux dans la façade seraient remplis de terre pour accueillir les plantes. L'impression 3D permet de créer des formes complexes qui deviendront des jardinières, comme le montre le schéma figure 2.

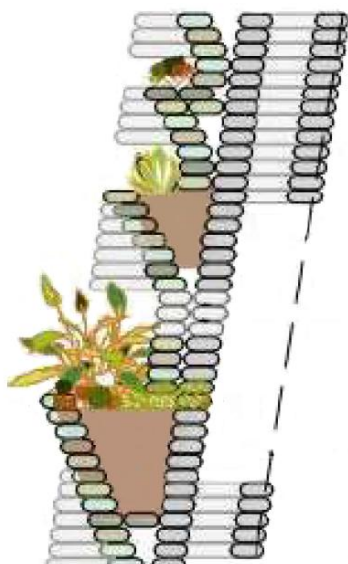


Figure 2 : Schéma de principe des jardinières obtenues par impression 3D, source : ISC (BET VINCI)

Pour avoir quelques notions de base sur les différentes techniques de parois végétalisées, le lecteur pourra se reporter à la ressource « Introduction aux murs végétalisés » [3].

2 - Technique d'impression 3D pour la construction

Plusieurs techniques d'impression 3D en béton pour la construction de bâtiments sont en développement. La ressource « *Imprimer des bâtiments en 3D : une nouvelle façon de construire demain* » [4] permet de se familiariser avec les différentes techniques existantes. La plus utilisée est celle du dépôt de béton par couches successives en suivant le trace des parois du bâtiment à construire. Les couches sont déposées les unes sur les autres par un robot équipé d'une buse. Un logiciel permet de connaître le parcours à effectuer par le robot et sa position par rapport au parcours qu'il doit suivre.

Les formulations de béton d'impression 3D sont quelque peu différentes des formulations de bétons classiques utilisées en Génie Civil. Ce sont dans la plupart des cas des micro-bétons : ils ne contiennent pas de gros granulats (graviers), mais seulement des granulats fins (sable). Le béton doit présenter certaines propriétés spécifiques à l'impression 3D : à l'état frais, il doit rester fluide lorsqu'il circule dans les tuyaux du robot, puis figer rapidement lorsqu'il est déposé par la buse afin de pouvoir empiler les couches suivantes rapidement.

Quelques obstacles rencontrés par cette technique sont, entre autres, la faiblesse des liaisons entre les différentes strates de béton, la régularité des couches, les bouchons dans les tuyaux du robot et la complexité des formulations de bétons utilisées. Citons par exemple les entreprises XtreeE et Vicat qui travaillent activement dans ce domaine.

En se basant des articles scientifiques, nous allons proposer le choix d'une formulation de béton pour l'impression 3D qui soit adaptée à une activité pédagogique réalisable par des élèves de STI2D AC et avec des matériaux et matériels courants disponibles dans une classe de lycée. Tout d'abord, les essais adaptés seront décrits. Puis, une analyse des résultats obtenus avec ces essais sera proposée afin de guider le lecteur dans l'application de ces essais lors d'une séance avec des élèves. Enfin, une séquence pédagogique sur les matériaux de construction ainsi qu'une séance de Travaux Pratiques et les documents de travail associés seront détaillés.

3 - Choix d'une formulation de béton : étude expérimentale

3.1 - Contexte pédagogique et normatif de l'étude

Cette étude expérimentale propose un axe d'adaptation pédagogique central. En effet, tous les essais qu'il est proposé de mener par la suite sont normalisés. Cependant, il a ici été fait le choix de s'affranchir des appareils normalisés spécifiques à ces essais et de certains protocoles laborieux, le véritable but de cette étude étant une approche pédagogique des sciences pour l'ingénieur, peu coûteuse et réalisable dans n'importe quel établissement.

3.2 - Matériaux

Trois matériaux ont été utilisés pour réaliser les différentes formulations de béton : du ciment, du sable et du superplastifiant. Un béton d'impression 3D contient parfois beaucoup d'adjuvants. Nous faisons le choix ici de ne pas utiliser autant d'adjuvants (seulement un peu de superplastifiant) car ils sont onéreux et certains peuvent être nocifs en cas de mauvaise manipulation par les étudiants. À la place, bien que cela n'ait évidemment pas le même effet à plusieurs niveaux, nous utiliserons un petit peu de superplastifiant et ajouterons de l'eau même si c'est moins réaliste, mais plus sécuritaire et manipulable par des étudiants.

Les matériaux employés dans cette étude sont les suivants :

- Ciment CEM I 52.5N PM-CP2 (contenant seulement du clinker et gypse), de masse volumique 3103 kg/m^3 ;
- Sable 0-2, de masse volumique 2338 kg/m^3 ;
- Superplastifiant ChrysoFluid OPTIMA 100 ;
- Eau (du robinet).

3.3 - Formulations

Six formulations de bétons ont été réalisées et testées pour cette étude en faisant varier d'une part, la quantité d'eau dans le mélange et, d'autre part, la quantité de superplastifiant, afin de montrer l'impact de l'un et de l'autre sur différentes propriétés des bétons frais et durcis. Elles sont détaillées dans le tableau 1. Dans chaque cas, le rapport Sable / Ciment (S/C) est égal à 1,5. Les rapports Eau / Ciment (E/C) et SuperPlastifiant / Ciment (SP/C) varient, et tous les paramètres restent dans les recommandations de [5] pour les bétons d'impression 3D.

Formulation	Ciment [g]	Sable [g]	Eau [g]	Superplastifiant [g]	E/C	SP/C
EC-034-SPC-001	882,4	1323,5	300,0	7,92	0,34	0,009
EC-036-SPC-001	882,4	1323,5	315,0	7,92	0,36	0,009
EC-037-SPC-001	882,4	1323,5	330,0	7,92	0,37	0,009
EC-042-SPC-001	882,4	1323,5	370,0	7,92	0,42	0,009
EC-036-SPC-000	882,4	1323,5	315,0	0,00	0,36	0,000
EC-036-SPC-002	882,4	1323,5	315,0	12,00	0,36	0,014

Tableau 1 : Formulations de béton d'impression 3D étudiées

3.4 - Méthodes

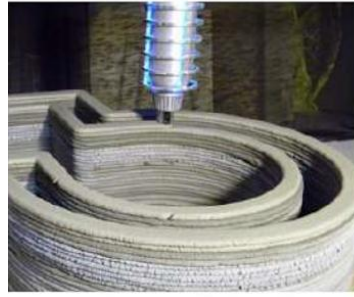
Dans cette partie, les protocoles des essais normalisés sur mortier, ou sur béton d'impression 3D, sont décrits, puis adaptés le cas échéant à une utilisation simple, pédagogique, peu coûteuse et réalisable avec les moyens disponibles en salle de classe. Lorsque ce type d'essai adapté est décrit, il a été réalisé pour cette étude expérimentale, et non l'essai normalisé, pour vérifier que la proposition fonctionne. Trois essais à l'état frais ont été réalisés : montage type impression 3D, masse volumique et étalement à la table à choc. Les essais effectués à l'état durci sont la masse volumique apparente, la flexion trois points et la compression.

La première étape avant tout essai est le malaxage de tous les composants de la formulation. La norme NF EN 196-1 [6] propose un protocole pour la réalisation de mortiers normalisés, qui nécessite une machine normalisée également (figure 3). Pour des étudiants, il suffira d'introduire tous les composants en même temps, et de mélanger manuellement à l'aide d'une maryse par exemple jusqu'à homogénéité du mélange.



Figure 3 : Malaxage normalisé (Source : STDE) et malaxage adapté des formulations

Étant donné que la façade du bâtiment sera imprimée en 3D avec du béton, on peut commencer par imaginer un test simple afin de déterminer si la formulation testée serait acceptable pour une telle application. On peut donc prendre un sac plastique sur lequel on coupe une pointe afin d'en faire une poche à douille ou un tube piston qui reproduit la buse de l'imprimante 3D. En exerçant une pression sur celle-ci, on peut empiler des couches de béton les unes sur les autres (figure 4). Cela permettrait aux étudiants de se rendre compte physiquement des enjeux du type de formulation de béton et de ses propriétés sur le montage, la pression dans la conduite... On peut également imaginer placer un patron plan sur la planche servant de plan de travail que les élèves doivent suivre afin d'obtenir une forme définie.



Montage réel



Montage adapté

Figure 4 : Montage réel (Source : 3Dnatives) et montage adapté d'impression 3D en béton

L'essai normalisé d'étalement à la table à secousse est détaillé dans la norme NF EN 1015-3 [7]. Il permet d'estimer la consistance d'un mortier frais. Un moule conique est placé sur la table à secousse, et rempli de mortier en deux couches. Le moule est retiré verticalement et 15 secousses sont appliquées à la table, à raison d'environ une secousse par seconde. On mesure le diamètre d'étalement du mortier dans deux directions perpendiculaires et on en fait la moyenne. Cet essai nécessite du matériel normalisé illustré en figure 5, mais a l'avantage d'être très visuel et facilement compréhensible par des étudiants : il paraît donc intéressant de le reproduire pour le principe, bien que le protocole soit adapté et les mesures non comparables avec des résultats d'ingénierie ou de recherche par exemple. On peut tenter de le reproduire avec des moyens simples : une planche et un cône tronqué fabriqué par exemple à l'imprimante 3D si l'établissement en dispose (figure 5). On nettoie la surface de la planche, on place le mortier dans le cône en le compactant un peu au fur et à mesure, puis on retire le cône. On applique 15 chocs à la planche en la soulevant horizontalement d'environ 5 cm, puis on mesure deux diamètres perpendiculaires du disque de mortier et on en fait la moyenne.

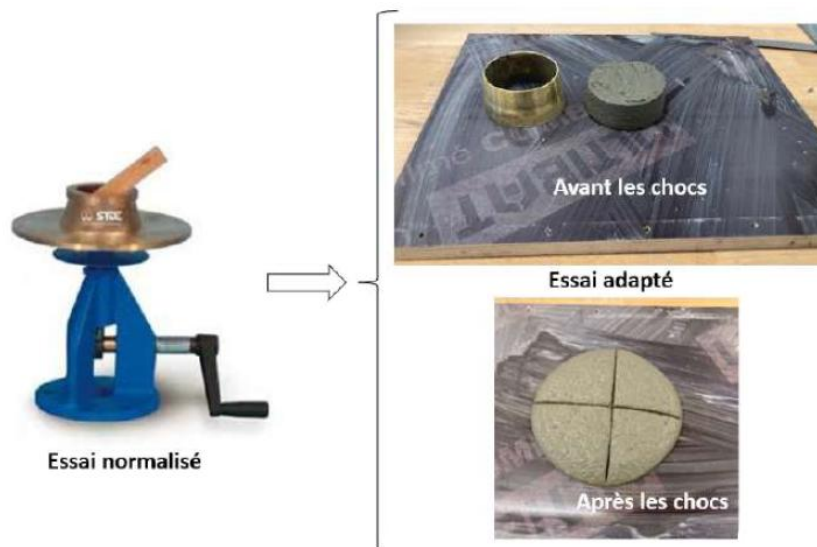
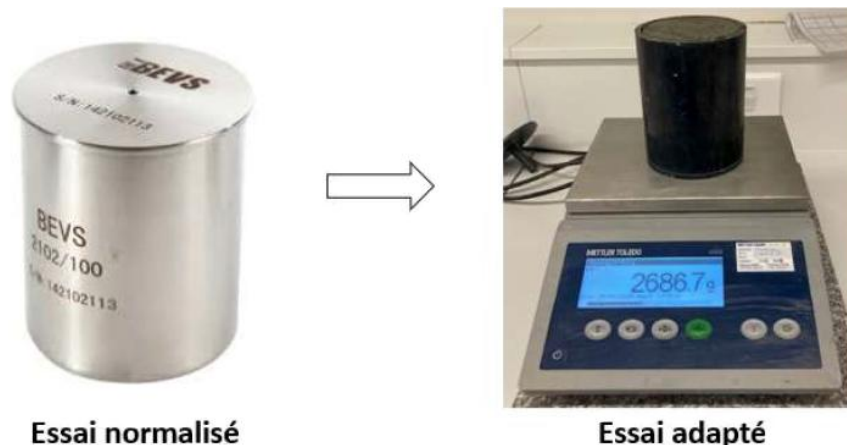


Figure 5 : Essai normalisé (Source : STDE) et adapté d'étalement d'un mortier frais

La norme NF EN 1015-6 [8] détaille le protocole de l'essai de détermination de la masse volumique à l'état frais. Le mortier frais à tester est introduit dans un pycnomètre (récipient dont on connaît le volume V_{pycno}) jusqu'à débordement. Le tout est ensuite vibré ou subit un certain nombre de chocs afin de compacter le matériau. La masse de matériau m_{pycno} est ensuite mesurée. On détermine donc la masse volumique du mortier frais (1) :

$$\rho_{app,frais} = \frac{m_{pycno}}{V_{pycno}} \quad (1)$$

Un pycnomètre en métal n'est pas très courant dans les établissements, surtout en lycée. Cependant pour le principe, on peut le remplacer par un récipient métallique ou plastique de volume connu (figure 6), et le protocole reste le même.



Essai normalisé

Essai adapté

Figure 6 : Essai normalisé (Source : Labo and Co) et adapté de détermination de la masse volumique à l'état frais

On suit le protocole de l'essai proposé par la norme NF EN 1015-10 [9] pour déterminer la masse volumique apparente à l'état durci. On sèche les éprouvettes à l'étuve à 70°C jusqu'à masse constante puis on mesure leur masse sèche m_s . Le volume V de l'éprouvette est normalisé d'après le moule (4 cm x 4 cm x 16 cm). On obtient la masse volumique apparente comme suit (2) :

$$\rho_{app,frais} = \frac{m_s}{V} \quad (2)$$

Cet essai est simple à réaliser pour des étudiants. Si le volume de l'éprouvette testée n'est pas normalisé, il suffit d'un pied à coulisse pour le mesurer. Seule la partie séchage à l'étuve ne peut pas être réalisée, mais peut être remplacée par un séchage à l'air libre sur plusieurs jours.

L'essai de flexion trois points est régi par la norme NF EN 1015-11 [10] pour les mortiers. Après coulage, les éprouvettes sont placées à 20°C et 95% d'humidité relative pendant 24 heures, puis démoulées et replacées dans les mêmes conditions jusqu'à 7 jours. Elles sont enfin placées à 20°C et 65% d'humidité relative pendant 21 jours. Pour réaliser l'essai, il suffit de placer l'éprouvette prismatique sur le banc d'essai de flexion trois points (figure 7a), et d'appliquer la charge à une vitesse de 40 N/s. On relève la charge à rupture F , puis on calcule la résistance à la flexion comme suit (3) :

$$f_{flexion} = 1.5 \frac{FL}{a^3} \quad (3)$$

où L est la distance entre les deux points de support de l'éprouvette et a l'épaisseur de l'éprouvette (fixée à 4 mm par les moules normalisés). Cet essai peut être adapté même si on ne possède pas la machine de chargement normalisée. On peut en effet utiliser le support BED100, assez répandu dans les établissements, avec un support de flexion trois points, et adapter la taille des éprouvettes à tester au banc et à l'effort maximal que le vérin peut exercer (pour être sûr d'atteindre la rupture). Le protocole de cure peut également être simplifié : démoulage au bout de 24 heures ou 48 heures, et prise à température et humidité relative ambiante. Les résultats obtenus après de tels essais ne pourront pas être comparés précisément à ceux de l'industrie/l'ingénierie et la recherche !

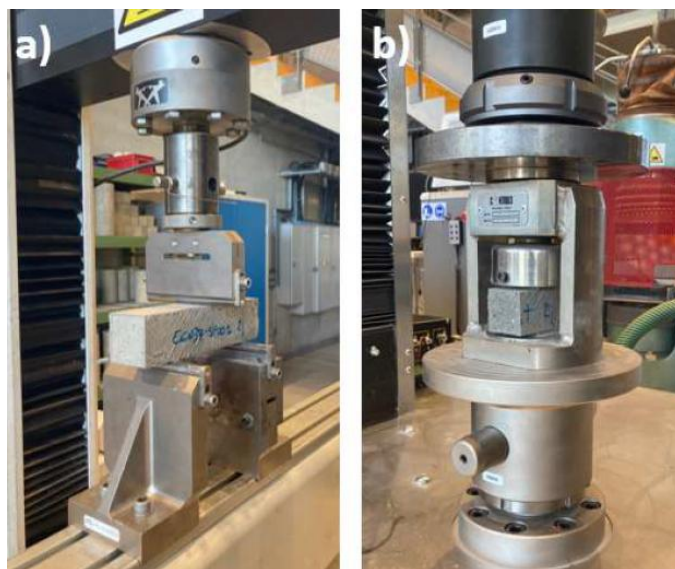


Figure 7 : Essai normalise de flexion 3 points a) et essai normalise de compression b) sur éprouvette 4 cm x 4 cm x 16 cm

Enfin, les essais de compression sur les mortiers suivent la norme NF EN 1015-11 [10]. Les conditions de cure sont les mêmes que pour la flexion. Le protocole expérimental est le suivant : former des petits prismes (soit après flexion trois points, soit en découpant l'échantillon à la scie à béton), placer une éprouvette sur la machine d'essai de compression (figure 7b), appliquer le chargement en suivant les vitesses préconisées dans la norme NF EN 1015-11, et relever la valeur de charge à rupture. La résistance en compression se calcule en divisant la charge à rupture par la surface de contact. On peut proposer les mêmes adaptations pour cet essai que pour celui de flexion trois points.

3.5 - Résultats expérimentaux et analyse

Les résultats de l'essai d'étalement sont donnés en figure 8. On remarque que pour une quantité de superplastifiant fixée, plus la quantité d'eau dans le mélange augmente, plus le diamètre moyen d'étalement est grand (passant de 13.1 cm à 16.8 cm), donc plus le matériau est fluide. En effet, dans ces ordres de grandeur classiques de E/C, ajouter de l'eau fluidifie le mélange. Cela peut ne plus être le cas au-delà d'un certain rapport E/C (on aurait de l'eau en surface, le mélange ne serait plus homogène). Le constat est le même lorsque l'on fixe la quantité d'eau dans le mélange et que l'on fait varier celle de superplastifiant : plus le rapport SP/C est élevé, plus la formulation est fluide (le diamètre d'étalement augmente de 39%). Ces essais permettent de voir clairement l'intérêt de l'utilisation d'un superplastifiant : il permet de rendre le mélange bien plus fluide, grâce à quelques gouttes seulement, sans changer la quantité d'eau. Ceci est un avantage non négligeable : en effet, moins d'eau dans le mélange implique moins de porosité dans le matériau durci, et donc une meilleure résistance en théorie. Nous verrons plus loin si cela est visible grâce aux essais à l'état durci.

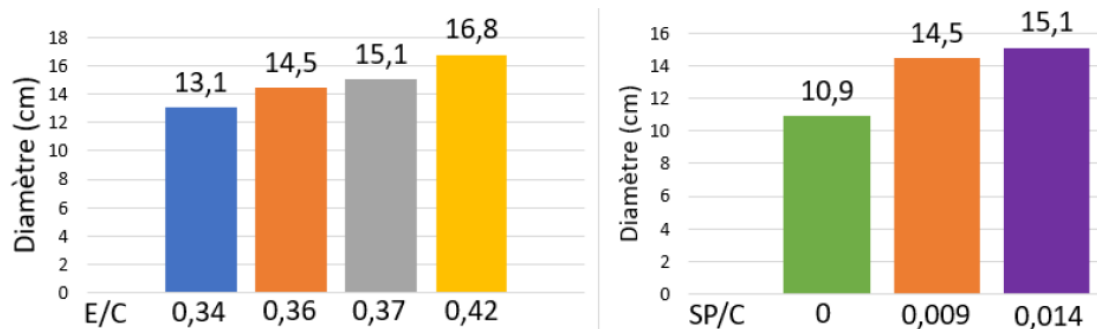


Figure 8 : Résultats de l'essai d'étalement en fonction de E/C et de SP/C

Les résultats des essais de masse volumique à l'état frais sont présentés en figure 9. On note que pour un rapport SP/C fixe, plus la quantité d'eau dans le mélange augmente, plus la masse volumique à l'état frais diminue (passant de 2215 kg/m³ à 2136 kg/m³). Ceci s'explique par le fait que l'eau a une masse volumique de 1000 kg/m³, ce qui est inférieur aux masses volumiques du sable et du ciment, respectivement de 2338 kg/m³ et de 3103 kg/m³. Donc si la quantité d'eau augmente, alors celle de sable et de ciment diminue, et la masse volumique du mélange avec. Les valeurs mesurées sont assez proches des valeurs calculées à partir des proportions de la formulation (au maximum 1.3% d'écart). Cependant, on constate que lorsque E/C est constant et que SP/C augmente, la masse volumique du mélange frais augmente également (d'environ 9%) ; on s'attendait, par le calcul, à une augmentation bien moins prononcée. Il semblerait que la formulation à SP/C = 0 soit loin des estimations (environ 8% d'écart). Il se pourrait que ces écarts soient dus au compactage, mais nous ne pouvons pas conclure de façon satisfaisante avec si peu de données (il faudrait répéter les essais pour avoir plus de résultats).

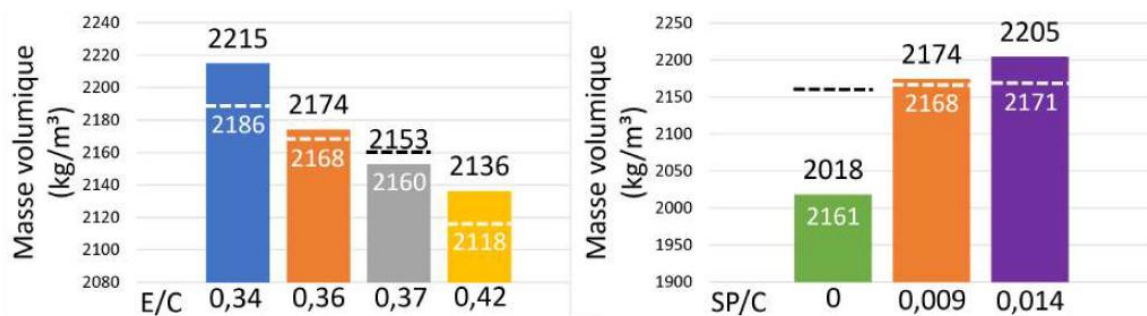


Figure 9 : Résultats de l'essai de masse volumique à l'état frais en fonction de E/C et de SP/C (les valeurs en blanc associées aux traits en pointillés pour les valeurs calculées ; les valeurs en noir situées au-dessus des barres colorées pour les valeurs mesurées)

Avant de commencer les montages, il est intéressant d'observer seulement les différents mélanges. On peut ainsi noter que les formulations à E/C = 0.34 et SP/C = 0 sont très sèches et ne s'étalent presque pas. Elles ne sont donc pas adaptées à l'impression 3D. Il en va de même pour la formulation à E/C = 0.42, qui est trop liquide pour l'impression 3D. Par soucis de temps, nous ne réalisons l'essai de montage que pour la formulation à E/C = 0.36 (avec SP/C = 0.009). D'après cet essai, cette formulation pourrait être adaptée à l'impression 3D : les couches sont aisément déposées sur le patron, ne se cassent pas, et on parvient à empiler 6 couches successives sans laisser de temps de prise. Cet essai est purement qualitatif, il permet également de mettre en évidence certaines difficultés rencontrées sur chantier, telles que l'irrégularité des couches ou l'évolution rapide de la consistance du mélange.

Après les essais à l'état frais, les formulations ont été coulées dans des moules à mortier normalisés de 4 cm x 4 cm x 16 cm et démoulées 48 heures après le coulage. Les éprouvettes ont été stockées à l'air libre entre le coulage et les derniers essais à 28 jours (tels qu'elles le seraient dans un établissement scolaire ne disposant pas de salles spécifiques de stockage pour les essais normalisés).

Passons aux essais à l'état durci. Les résultats d'essais de masse volumique à l'état durci sont disponibles en figure 10. On remarque que les allures sont assez similaires à celles des graphes d'essais de masse volumique à l'état frais. On constate également que les masses volumiques sont toutes un peu plus élevées à l'état durci qu'à l'état frais, car le compactage dans le moule normalisé est effectué par une table vibrante, ce qui n'était pas le cas pour la masse volumique à l'état frais.

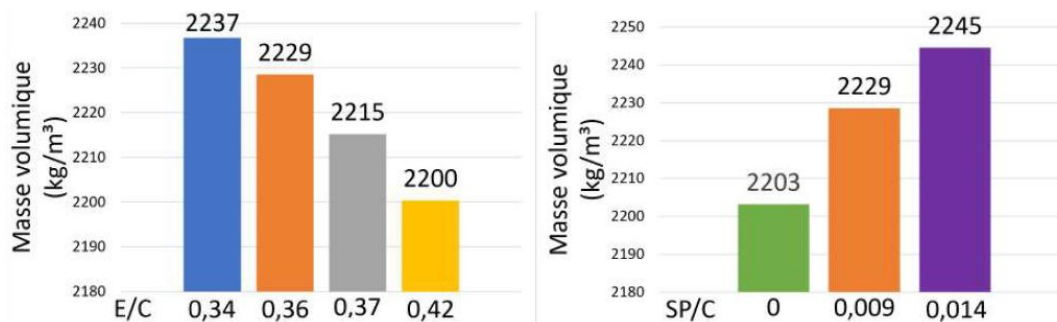


Figure 10 : Résultats de l'essai de masse volumique à l'état durci en fonction de E/C et de SP/C

Les essais de flexion trois points et de compression donnent les résultats en figures 11 et 12. Ils ont été réalisés 2, 7 et 28 jours après la date de coulage. On constate globalement que la résistance en flexion et de compression augmente avec temps car la prise du ciment n'est pas instantanée. Si on traçait la résistance en fonction du temps sur plusieurs semaines, on verrait en théorie une asymptote horizontale apparaître au bout d'un certain temps. Conventionnellement, on a fixé ce temps à 28 jours.

On remarque également que, plus le rapport E/C augmente (avec SP/C fixe), plus la résistance en flexion et en compression est faible. En effet, plus il y a d'eau dans la formulation, plus il y aura de porosité à l'état durci car une partie de l'eau ne sert pas à la prise mais s'évapore. La porosité ayant une résistance mécanique nulle, plus il y en a, moins il y a de béton, qui lui résiste, et plus la résistance globale de l'ensemble diminue. En outre, la variation du rapport SP/C (avec E/C fixe) n'entraîne pas de variation significative de la résistance en flexion et en compression. En effet, le superplastifiant est très utile pour modifier la rhéologie du mélange à l'état frais, mais n'a pas vraiment d'impact sur la résistance mécanique à l'état durci.

Globalement, les résistances en flexion atteignent au minimum 9.5 MPa à 28 jours, ce qui est en accord avec la valeur trouvée par [11] avec ses 7 MPa pour des bétons d'impression 3D. De la même manière, les résistances en compression s'étendent de 52 MPa à 80 MPa à 28 jours, ce qui est conforme à la valeur 58 MPa proposée par [11]. À noter que ces valeurs ne seront pas exactement celles obtenues lorsque le béton sera monté par impression 3D.

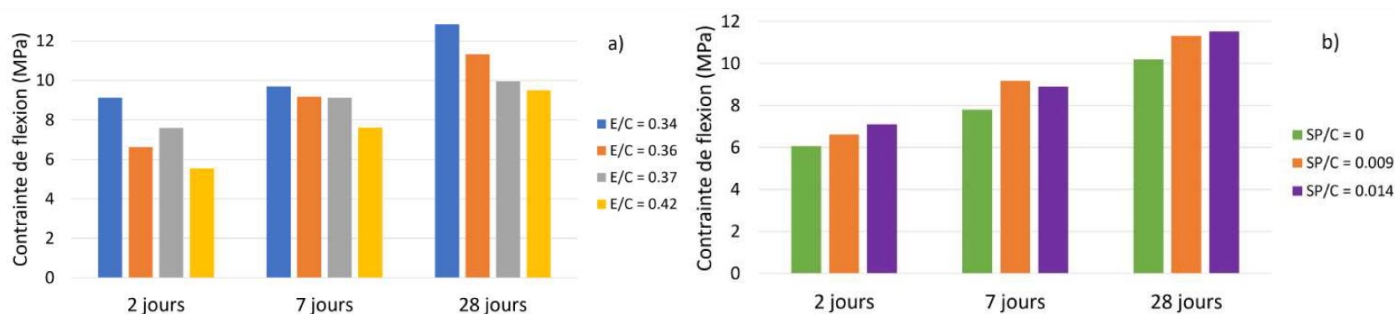


Figure 11 : Résultats de l'essai de flexion trois points en fonction de : a) E/C et b) SP/C

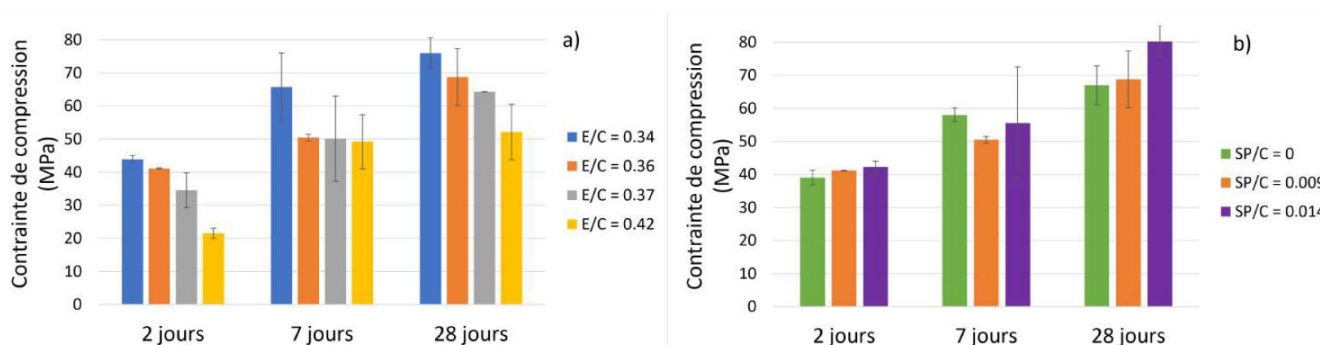


Figure 12 : Résultats de l'essai de compression en fonction de : a) E/C et b) SP/C

3.6 - Conclusion de l'étude

Les essais menés dans cette étude soulèvent plusieurs points :

- La formulation la mieux adaptée à l'impression 3D est celle à $E/C = 0.36$ et $SP/C = 0.009$, car elle est assez fluide pour être montée, les couches se tiennent les unes sur les autres et ses résistances en flexion et compression sont compatibles avec cette utilisation. Cependant, c'est une formulation simplifiée pour illustrer des principes, et elle ne pourrait jamais être utilisée telle qu'elle sur un chantier réel par exemple.
- Pas besoin d'avoir des machines de pointes et du personnel expert pour réaliser des essais simples et évocateurs ! Tous les essais proposés peuvent être réalisés dans un établissement scolaire avec des moyens simples ou des machines assez courantes, mais avec des protocoles adaptés. Ceci ne fausse en rien les analyses sur le comportement des matériaux, et permet aux étudiants de manipuler de nouveaux objets de leurs propres mains.

Il est important de préciser que les essais de flexion ont été réalisés sur une seule éprouvette par formulation, et les essais de compression sur deux éprouvettes par formulation. Ainsi, nous n'avons pas pu vérifier si les résultats étaient répétables, et cela peut expliquer les grandes incertitudes sur les résultats dans ces essais. Il faudrait faire plus d'éprouvettes d'une même formulation pour avoir des résultats convaincants. Cependant, nous avons souhaité privilégier, dans un objectif pédagogique, un plus grand nombre de formulations différentes pour illustrer des phénomènes intéressants plutôt que de faire plusieurs fois les mêmes pour s'assurer de la répétabilité des résultats. Ainsi, ces derniers ne pourraient pas être utilisés dans le cadre d'une réelle étude professionnelle d'ingénierie ou de recherche. Ils sont encore une fois à relativiser mais permettent malgré tout d'illustrer des phénomènes, ce qui était l'objectif. Néanmoins, si un ou une enseignant(e) décide de mener ces essais durant quelques années, il ou elle pourra se constituer une base de données et pourra vérifier la répétabilité des résultats.

4 - Exploitation pédagogique en pré-baccalauréat STI2D AC

La formation STI2D (Sciences et Technologies de l'Industrie et du Développement Durable) se déroule en lycée général et technologique sur les deux années de première et terminale. Le baccalauréat technologique de cette spécialité permet de poursuivre en études supérieures : BTS, BUT, licence, CPGE (TSI ou TPC), écoles d'ingénieur post-baccalauréat pour les plus courants, ou encore d'entrer dans la vie active.

Outre les enseignements communs (mathématiques, physique-chimie, français en 1^{ère}, philosophie en terminale, EPS, histoire-géographie, langues vivantes, Enseignement Moral et Civique), les enseignements de spécialités technologiques sont repartis par année : en classe de première, les deux spécialités technologiques sont Innovation Technologique IT et Ingénierie et Développement Durable I2D ; en classe de terminale, la spécialité technologique est Ingénierie, Innovation et Développement Durable 2I2D. Dans cette spécialité, les étudiants ont le choix entre quatre enseignements spécifiques, qui permettront de façonner leur parcours : Architecture et Construction AC, Energies et Environnement EE, Innovation Technologique et Éco-Conception ITEC et Systèmes d'Information et Numérique SIN. Quel que soit l'enseignement spécifique choisi, la formation s'articule autour de des approches pluridisciplinaires STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics) et MEI (Matière, Énergie, Information). Deux projets sont menés au cours de la formation (36 h en fin de première, 72 h en fin de terminale) permettant de mobiliser toutes les compétences acquises au cours de la formation pour répondre à une problématique technologique.

La spécialité AC est celle qui nous intéresse particulièrement, puisqu'elle aborde une part du Génie Civil : analyse du besoin, communication entre les acteurs du Génie Civil, impact environnemental, enveloppe et ossatures, porteurs, soutènement, résistance des matériaux, réseaux de transport de fluide, choix de matériaux, conception bioclimatique et équipements énergétiques par exemple. Il s'agit dans la plupart des cas de présenter ces thèmes aux étudiants et de leur donner quelques clés dans le domaine, en privilégiant une approche mêlant développement analytique, numérique et expérimental.

4.1 - Objectifs de la séquence pédagogique proposée

La séquence choisie en STI2D AC s'articule autour du thème "Construire les ouvrages de demain". Elle s'intitule « *Les matériaux pour les constructions de demain : les trois petits cochons étaient-ils visionnaires ?* » en référence aux maisons que ces personnages de conte ont édifiées en paille, bois et briques, matériaux biosourcés qui font leur grand retour dans les constructions modernes (voir la ressource « Introduction au matériau bois dans la construction » [12]). Dans cette séquence seront présentés les principaux matériaux utilisés dans la construction, et une méthode de choix multicritère sera mise en place. Les objectifs liés à cette séquence sont :

- O1 : Caractériser les principales propriétés mécaniques des matériaux et leur comportement
- O2 : Sélectionner les principaux matériaux de construction du Génie Civil en fonction de leurs propriétés mécaniques, leur impact environnemental, leur utilisation/mise en œuvre sur chantier (analyse et sélection multicritère)
- O3 : Mener des essais expérimentaux afin de mettre en lumière un comportement/une propriété d'un matériau
- O4 : Participer à un débat scientifique et technique en défendant un camp

Cette séquence permet d'aborder les grands objectifs de formation suivants proposés par le référentiel :

- Caractériser des produits ou des constituants en privilégiant un usage raisonné du point de vue développement durable ;
- Imaginer une solution, répondre à un besoin ;
- Expérimenter et réaliser des prototypes ou des maquettes ;
- Communiquer une idée, un principe ou une solution technique, un projet, y compris en langue étrangère.

4.2 - Savoirs et savoir-faire

Les savoirs et savoir-faire à maîtriser à la fin de cette séquence sont les suivants (liés pour la plupart au savoir 4.2.2 du référentiel) :

- Les matériaux courants pour construire (acier, bois, béton, béton armé, maçonnerie, terre, paille...) : composition, fabrication, caractéristiques et particularités, propriétés (résistance élastique, à la rupture, module d'Young, masse volumique, humidité, porosité, impact environnemental), courbe contrainte/déformation et comportement (élastique, plastique, fragile, ductile), domaines d'utilisation, avantages et inconvénients ;
- Comparaison de certaines propriétés par des essais (résistance, masse volumique, module d'Young, étalement) ;

- Choix multicritères de matériaux de construction : résistance mécanique/effort repris, module d'Young, taille de section, poids, impact environnemental, méthode de choix (avec le diagramme d'Ashby et un diagramme radar par exemple).

4.3 - Compétences

De nombreuses compétences sont travaillées lors de cette séquence. Certaines sont seulement abordées (en tout ou partie), tandis que d'autres sont évaluées en cours ou en fin de séquence. Elles pourront être abordées de nouveau voire évaluées de nouveau dans d'autres séquences. Les compétences évaluées sont :

- C04.3 : présenter de manière argumentée des démarches, des résultats, y compris dans une langue étrangère (totalement mobilisée et évaluée) ;
- C05.8 : proposer des solutions constructives répondant aux contraintes et attentes d'une construction ; proposer et choisir des procédés de mise en œuvre d'un projet de construction et organiser les modalités de sa réalisation (totalement mobilisée et évaluée) ;
- C07.5 : mettre en œuvre un scénario de validation devant intégrer un protocole d'essai, de mesures et/ou d'observations sur le prototype ou la maquette, interpréter les résultats et qualifier le produit (totalement mobilisée et évaluée) ;
- C07.6 : expérimenter sur des ouvrages ou des maquettes physiques simplifiées et instrumentées pour étudier l'usage ou le comportement d'un ouvrage réel ou celui d'éléments constitutifs et valider des choix techniques (totalement mobilisée et évaluée).

Les compétences abordées seulement sont :

- C01.1 : justifier les choix des structures matérielles d'un produit, identifier les flux mis en œuvre dans une approche de développement durable (totalement mobilisée) ;
- C05.5 : proposer des solutions à un problème technique identifié en participant à des démarches de créativité, choisir et justifier la solution retenue (totalement mobilisée) ;
- C05.7 : définir la structure matérielle, la constitution d'un produit en fonction des caractéristiques technico-économiques et environnementales retenues (totalement mobilisée).

4.4 - Prérequis et positionnement temporel

Plusieurs prérequis sont utiles à cette séquence de matériaux de construction, parmi lesquels :

- PR1 : Physique : force, homogénéité, états de la matière
- PR2 : Choix de matériau 4.2.2 vu en IT
- PR3 : Résistance des matériaux 3.2.3
- PR4 : Quelques bases de vocabulaire de structure : poutre, poteau, ossature, dalle
- PR5 : Bases de mathématiques

Les savoirs et savoir-faire en lien avec la résistance des matériaux seront utiles pour mettre en place la méthode de choix des matériaux d'un point de vue mécanique. Les notions et méthodes de choix vues en I2D seront rapprochées de celles proposées plus spécifiquement pour le Génie Civil (avec le diagramme d'Ashby par exemple). Certaines notions vues en physique (et revues lors de l'introduction de la séquence de résistance des matériaux) seront essentielles pour comprendre les propriétés des matériaux de construction. Les bases de mathématiques seront nécessaires afin de

mener de petits calculs de résistance des matériaux ou de dimensionnement simple. Maîtriser le vocabulaire courant de structures simples du Génie Civil sera également utile pour aborder les activités de choix de matériaux en conditions "réelles".

Ces prérequis permettent de positionner temporellement la séquence pédagogique. Elle est créée spécifiquement pour des STI2D AC, et doit donc s'inscrire en classe de terminale. Il faut avoir vu la résistance des matériaux, et il faut laisser la place aux 72 heures de projet en fin d'année. Il semble donc judicieux de placer cette séquence au milieu de l'année de terminale, aux alentours des vacances de Noël par exemple.

4.5 - Présentation de la séquence

4.5.1 - Organisation temporelle de la séquence

Le volume horaire n'est pas imposé pour cette séquence. Les emplois du temps des STI2D sont fixes d'une semaine sur l'autre (en termes de répartition des élèves en classe entière ou demi-groupes). Le référentiel impose 12 h de 2I2D par semaine. On prendra comme hypothèse que ces 12 h sont divisés en 3 h en classe entière de tronc commun et 9 h de spécialité AC. Ces 9 h seront redivisées en 3 h en classe entière, 3 h en demi-groupe de TD et 3 h en demi groupe de TP. Il est décidé d'allouer 2 semaines et demi de spécialité AC à cette séquence, donc 22.5 heures. Concernant l'effectif, on suppose au total 24 élèves en classe entière, et des groupes de TD et TP de 12 élèves (demi-groupes). L'organisation de la séquence pédagogique est présentée en figure 13. Le détail de la séance 5 est proposé dans la partie suivante (5.6), et le détail des séances 10 et 13 est disponible en annexe 2 [13].

Semaine 1				
Séance 1 TD1 1,5h	Séance 2 CE1 1,5h	Séance 3 TD2 1,5h	Séance 4 CE2 1,5h	Séance 5 TP1 3h
Évaluation diagnostique prérequis de RdM, recherche sur les matériaux utilisés en construction, synthèse	Béton / acier / bois : composition, ressources, fabrication, utilisation	Comportements : élastique, plastique, ductile, fragile → intérêt du béton armé, analyse de documents, essais de flexion (béton, acier, béton armé) menés par l'enseignant	Béton / acier / bois : comportement et propriétés (mécanique, ACV, prix...), tableau de synthèse	Béton frais et durci, lien avec impression 3D

Semaine 2				
Séance 6 TD3 1,5h	Séance 7 CE3 1,5h	Séance 8 TD4 1,5h	Séance 9 CE4 1,5h	Séance 10 TP2 3h
Choix matériau : comparaison mécanique acier et bois, mise en place inductive méthode de choix	Méthodologie de sélection multicritère de matériaux, outil Excel	Choix de matériau 1 : analyse multicritère cas réel, outil Excel	Autres matériaux porteurs : maçonnerie, terre, paille, plâtre...	Acier et bois : propriétés mécaniques et particularités (anisotropie, humidité, rupture, instabilités)

Semaine 3		
Séance 11 TD5 1,5h	Séance 12 CE5 1,5h	Séquence suivante
Choix de matériau 2 : analyse multicritère cas réel, outil Excel	Remédiation : évaluation formative, reprise des points de difficulté, TD en autonomie sur matériaux du CE4	

Semaine 4	
Séance 13 TD6 1,5h	Séquence suivante
Evaluation sommative : débats	

Figure 13 : Organisation temporelle de la séquence "Choix des matériaux de construction"

On rappelle que la séquence est guidée par la problématique globale « *Les matériaux pour les constructions de demain : les trois petits cochons étaient-ils visionnaires ?* » La succession des séances va aborder plusieurs aspects de la question, et une synthèse/réponse globale sera apportée lors de la dernière séance en classe entière. Les activités proposées dans chaque séance sont détaillées en annexe 2 [13].

Diverses ressources pédagogiques sont à disposition des étudiants pour cette séquence pédagogique (dans la classe et parfois en dehors) :

- Éprouvettes des différents matériaux et en mousse (pour visualiser leur aspect, leurs formes classiques en construction, pour visualiser les sollicitations mécaniques appliquées) ;
- Suite bureautique (pour les calculs et rendus écrits) ;
- Vidéos en ligne sur la mise en œuvre des matériaux sur chantier (pour avoir une idée de l'utilisation réelle de ces matériaux porteurs) ;
- Outil de comparaison des matériaux : calcul de contrainte dans une section de poutre/poteau, émissions de CO₂, diagramme radar (pour comparer de façon systématique et rapidement des matériaux en appliquant la méthode) ;
- Dossier support sur un ouvrage réel construit en impression 3D (pour visualiser la mise en œuvre sur chantier et comme support des TP 4 et 5 et du TP1).

Nous proposons aux élèves un outil Excel (fourni en annexe 1 [13]) développé pour le choix de matériaux de construction. L'objectif est triple : systématiser la méthode de sélection, comparer des matériaux selon cinq critères (contrainte maximale, flèche maximale, masse, émissions de CO₂ et prix) et se rendre compte par itération des solutions qui fonctionnent ou non parmi certaines propositions normalisées (sentir un peu plus physiquement les choses en faisant varier certains paramètres). Il se présente en quatre feuilles : celle de consignes et de conseils d'utilisation, puis une feuille de calcul (non accessible aux utilisateurs), une troisième où l'utilisateur entre ses paramètres de modélisation et choisit la section qu'il souhaite, avec les résultats des 5 paramètres calculés, et enfin la dernière feuille de comparaison d'au maximum 5 solutions. L'utilisateur doit copier-coller les 5 indicateurs de la feuille de résultats vers la feuille de comparaison s'il veut réaliser cette action. Un graphe radar se construit au fur et à mesure pour effectuer cette comparaison. Cet outil n'est développé que pour une poutre en flexion, mais on pourrait aisément en imaginer un très similaire qui traiterait les cas de compression et traction. Un exemple d'utilisation de cet outil est présenté en figures 14 et 15.

Résultats					
$\sigma_{\max} =$	102,2 MPa	$\leq$	$R_{pe} =$	117,5 MPa	Cool, ça fonctionne !
$f_{\max} =$	18,36 mm	$>$	$f_{lim} =$	15 mm	Aïe, ça ne marche pas !
Masse :	64,5 kg				
CO2 :	66,4 kgCO2eq				
Prix :	225,75 €				

Figure 14 : Page de résultats avec l'outil Excel sur un exemple d'utilisation

Tableau récapitulatif pour comparaison des résultats					
Numéro	Matériau n°1	Matériau n°2	Matériau n°3	Matériau n°4	Matériau n°5
Nom	IPE 140 S235	C40/50 200*400 cm ²	GL24h 150*300 cm ²		
Contrainte maximale (MPa)	102,2	2,5	4,0		
Flèche maximale (mm)	18,4	1	5,5		
Masse poutre (kg)	64,5	960,0	96,3		
Émissions de CO2 (kgCO2eq)	66,4	139,4	5,3		
Prix matériau seulement (€)	225,75	121,78	361,56		

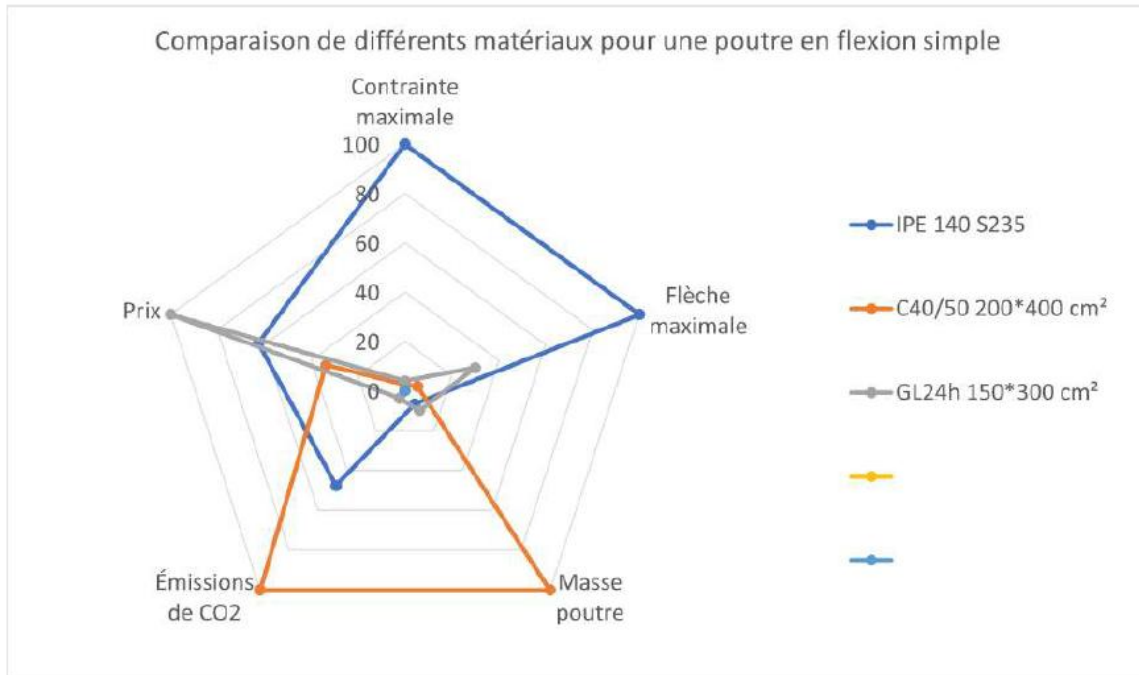


Figure 15 : Page de comparaison de l'outil Excel sur un exemple d'utilisation

Lors des différentes séances, il existe plusieurs possibilités de différenciation des activités afin de tenter de s'adapter au rythme des élèves :

- TD1 : les élèves sont par petits groupes, chacun fait des recherches en autonomie et à son rythme sur son matériau ;
- TD4 et TD5 : les groupes les plus rapides / qui ont le mieux compris pourront étudier deux cas réels au lieu d'un seul (par exemple une poutre en flexion et un poteau en compression) ;
- TDs : questions "pour aller plus loin" pour les élèves les plus rapides ;
- CE5 : séance de remédiation, pendant laquelle un groupe d'étudiants retravaille les points de difficulté avec l'enseignant tandis que l'autre est en activité plus autonome sur les matériaux abordés en CE4.

4.5.2 - Évaluation

Durant toute la séquence, les étudiants sont suivis et évalués afin qu'ils puissent se situer vis-à-vis de leur apprentissage et de l'obtention de leur diplôme du baccalauréat en fin d'année :

- Évaluation diagnostique sur les prérequis de Résistance des Matériaux en début de TD1 ;
- Évaluation formative par un QCM en ligne sur les caractéristiques principales du béton, de l'acier et du bois, avant le TD3 ;
- Évaluation formative sur toute la séquence pour identifier les points à retravailler (séance de remédiation) ;
- Fiches compte-rendu à trous à compléter par les élèves pour les TP1 et TP2 (annexe 3 [13]) ;

- Évaluation sommative : compte-rendu synthétique du choix de matériau effectué pour l'activité du TD4/TD5 ;
- Évaluation sommative : débats autour de certains matériaux de construction dans une situation réelle précise (séance 13).

Livrable	Compétences évaluées	Coefficient
Compte-rendu TP1 et TP2	CO7.5 et CO7.6	2
Rendu TD4/TD5	CO5.8	5
Débat	CO4.3	3

Tableau 2 : Détails sur les différents livrables de la séquence

Il a été choisi ici de réaliser une partie de l'évaluation sommative sous forme de débats entre les élèves d'un groupe de TD. Les compétences en matière de sélection de matériaux étant déjà évaluées sur les travaux fournis en séances de TD4 et TD5, il s'agit ici de se concentrer sur l'aspect matériaux de construction et expression orale. Au-delà d'une présentation plus classique, organiser un débat présente plusieurs avantages :

- Offrir une motivation supplémentaire aux étudiants qui vont devoir affronter leurs camarades dans une ambiance conviviale ;
- Mettre en œuvre des compétences d'expression tout en insistant sur l'objectif de convaincre le public, être percutant, défendre ses idées en contrant les arguments de l'adversaire, et mettre du cœur dans son discours ;
- Ce débat se prépare en amont et en autonomie, avec un contexte donné (avec une bibliographie proposée par l'enseignant et d'autres ressources potentielles libres). Cela oblige les étudiants à envisager toutes les questions possibles, ou tous les arguments contre leur proposition (tout autant que ceux pour), afin d'être à même de pouvoir les contrer efficacement avec des arguments solides et chiffrés.

Chaque groupe d'élèves serait composé de 2 étudiants, et un débat opposerait 2 groupes de 2 élèves. Il y aurait donc 3 débats dans une séance de TD : les 12 élèves passeraient donc au cours de la séance. Chaque débat durerait 15 minutes (animés par l'enseignant), suivi de 10 minutes de remarques sur la prestation et de remédiation pour les éventuels arguments erronés avancés par les élèves. Quelques thèmes imaginés pour ces débats sont donnés en annexe 2 [13].

4.6 - Détail de la séance de TP1

La séance détaillée ci-dessous correspond à la séance de TP1, qui traite de béton frais et durci, et du lien avec l'impression 3D. Cette séance est une occasion unique pour chaque élève de manipuler de ses mains un matériau de construction et de réaliser des essais ressemblant fortement aux essais normalisés utilisés dans le monde de l'industrie et de la recherche. L'objectif est d'observer des phénomènes propres à ce matériau, de caractériser certaines de ses propriétés, de réfléchir sur le sens des essais, sur comment on peut choisir une formulation selon le cas d'utilisation, et de comprendre ce qui diffère entre un béton classique et un béton d'impression 3D. Cette séance a lieu dans une salle avec beaucoup de place au sol, et qui contient le matériel pour les essais : blouses (empruntées aux collègues de physique-chimie), gants jetables, masques jetables, saladiers, maryses, balances, planches, cônes tronqués, contenants de volume connu, sachets plastiques, patrons pour l'essai de montage, petites truelles et coupelles, moules en polystyrène, réglets, BED100 et petite presse. Il serait demandé aux élèves de venir, pour cette séance, habillés de vêtements et chaussures qu'ils peuvent salir. L'organisation de la séance est décrite en figure 16.

Séance 5	TP1, 3h
Effectif	12 étudiants (donc 2 séances différentes pour l'enseignant)
Objectifs	O1 : Caractériser les principales propriétés mécaniques des matériaux et leur comportement O3 : Mener des essais expérimentaux afin de mettre en lumière un comportement/une propriété d'un matériau
Prérequis	PR1 : Physique PR3 : Résistance des matériaux (3.2.3) PR4 : Vocabulaire de structure PR5 : Bases de mathématiques
Compétences abordées	CO4.3 : présenter de manière argumentée des démarches, des résultats, y compris dans une langue étrangère CO7.5 : mettre en œuvre un scénario de validation devant intégrer un protocole d'essai et d'observations, interpréter les résultats et qualifier le produit CO7.6 : expérimenter sur des ouvrages ou des maquettes physiques simplifiées pour étudier l'usage ou le comportement d'un élément constitutif et valider des choix techniques
Activités	• Lancement de la séance : objectifs, consignes générales et de sécurité, formation de 4 groupes de 3 élèves, distribution des comptes-rendus (10 min) • Présentation des composants du béton, du matériel de mélange et d'essais à l'état frais, lien avec le projet de VEOLIA et l'impression 3D (20 min) • Mesure des masses de tous les composants pour chaque groupe (20 min) • Fabrication du béton pour chaque groupe en même temps que l'enseignant (10 min) • Essai de montage à la poche à douille (15 min) • Essais à l'état frais de masse volumique et d'étalement pour chaque groupe en même temps que l'enseignant (20 min) • Coulage du béton dans les moules en polystyrène (20 min) • Nettoyage et rangement du matériel (15 min) • Présentation des bancs pour les essais à l'état durci (15 min) • Essais de masse volumique, flexion 3 points et compression (25 min) • Conclusion de la séance, points à retenir (10 min)
Supports et ressources	• Ciment, sable et eau • Eprouvettes de béton • Matériel de mélange du béton • Matériel d'essai à l'état frais • Matériel d'essai à l'état durci • Dossier support sur un ouvrage réel construit en impression 3D
Suivi / évaluation	• Compte-rendu par petits groupes à compléter

Figure 136 : Déroulement de la séance 5 (TP1)

4.7 - Conclusion sur la proposition de séquence

La proposition de séquence pédagogique présentée n'est qu'une possibilité parmi tant d'autres. Néanmoins, elle a l'avantage de proposer des activités originales aux élèves (expérimentations avec les mains et débats), ce qui permettra de les motiver, d'élargir leurs compétences et leur ouverture d'esprit. La proposition d'essais et de protocoles adaptés est également un atout de taille, qui permettrait d'ajouter une partie plus pratique à l'enseignement en STI2D, de plus en plus tourné vers le numérique. Même si la partie tronc commun n'a pas été mentionnée ici, la thématique de choix de matériau peut également faire l'objet de quelques heures mixées avec d'autres spécialités que AC, pour faire le lien avec d'éventuels sujets de baccalauréat plus généraux.

Références :

- [1]: Risque naturels et technologiques - Enjeux urbains et paysagers - Usine de Choisy-le-Roi du SEDIF, débat public, <https://www.debatpublic.fr/sites/default/files/2023-04/Risques%20naturels%20et%20technologiques%20et%20Enjeux%20urbains%20et%20paysagers-Choisy-Neuilly.pdf>
- [2]: Le puissant Syndicat des eaux d'Île-de-France investit un milliard d'euros dans ses usines, les échos, décembre 2024, <https://www.lesechos.fr/pme-regions/ile-de-france/le-puissant-syndicat-des-eaux-dile-de-france-investit-un-milliard-deuros-dans-ses-usines-2137733>
- [3]: Introduction aux murs végétalisés, E. Celeschi, C. Desodt, H. Horsin Molinaro, 2026, https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/introduction-aux-murs-vegetalises
- [4]: Imprimer des bâtiments en 3D : une nouvelle façon de construire demain, E. Celeschi, C. Desodt, H. Horsin Molinaro, 2026, https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/imprimer-des-batiments-en-3d
- [5]: Composition des bétons imprimés en 3D - Substitution de composants issus des matières premières par des fines de briques. Rapport technique, L. Saelen, 2020
- [6] : NF EN 196-1, Méthodes d'essai des ciments - Partie 1 : Détermination des résistances, AFNOR, 2016
- [7]: NF EN 1015-3, Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 3 : Détermination de la consistance du mortier frais (avec une table à secousses), AFNOR, 1999
- [8]: NF EN 1015-6, Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 6 : Détermination de la masse volumique apparente du mortier frais, AFNOR, 1999
- [9]: NF EN 1015-10, Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 10 : Détermination de la masse volumique apparente sèche du mortier durci, AFNOR, 2000
- [10]: NF EN 1015-11, Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 11 : Détermination de la résistance en flexion et en compression du mortier durci, AFNOR, 2019
- [11]: Large-scale digital concrete construction - CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing, *Automation in Construction*, V. Mechtcherine, V. N. Narella, F. Will, M. Nather, J. Otto, et M. Krause, 2019
- [12]: Introduction au matériau bois dans la construction, H. Horsin Molinaro, J. Lépine, X. Jourdain, février 2022, https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/introduction-au-materiau-bois-dans-la-construction
- [13]: Annexes « Façade végétalisées en béton impression 3D - exploitation pédagogique », E. Celeschi, C. Desodt, H. Horsin Molinaro, 2026, https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/facade-vegetalisees-en-beton-impression-3d-exploitation-pedagogique
- Annexe 1 : Outil Excel de sélection de matériaux
 - Annexe 2 : Séquence pédagogique et séances
 - Annexe 3 : Compte rendu à compléter TP1