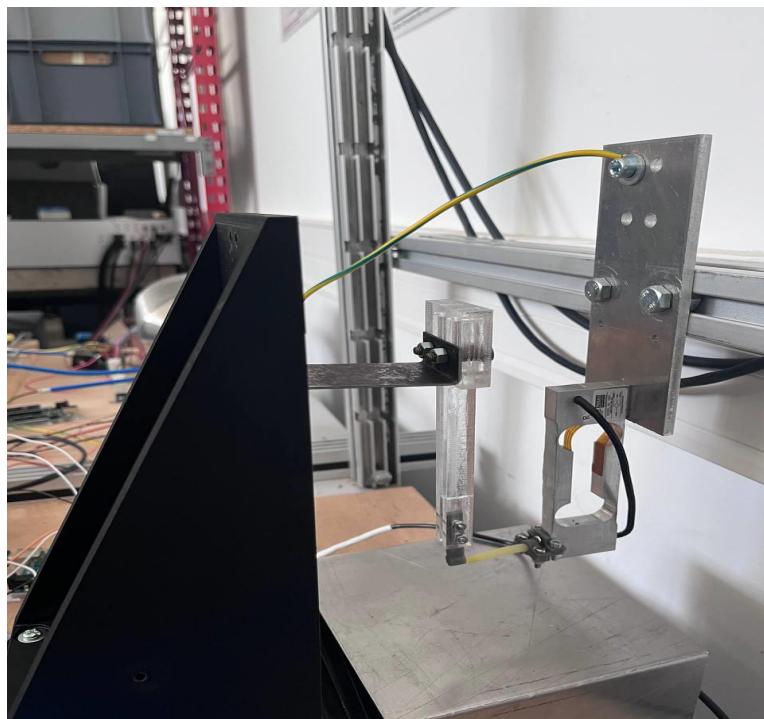


Rapport de stage de deuxième année 2024/2025 :

**Développement d'un banc d'essai pour étudier
les caractéristiques mécaniques de la pomme de terre**



Etudiant: BIN MOHAMAD NIZAM
Muhammad Hakimi Farhan

Tuteur Entreprise : Loïc TADIRST

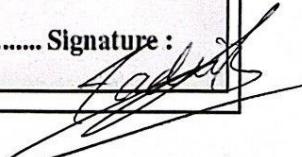
Tuteur Universitaire : Rémy MAZOYER

Lieu de stage: Laboratoire ISM
Adresse : 413 Avenue Gaston Berger,
13090, Aix-en-Provence
Site : IUT Aix-Marseille
Département : ISM équipe SBI
Adresse : 413 Avenue Gaston Berger,

1. Fiche d'identité et de confidentialité

Fiche confidentialité.png (Image PNG, 1192 × 1115 pixels) - Redi...

https://ametice.univ-amu.fr/pluginfile.php/9497178/mod_resource/..

FICHE D'IDENTITE ET DE CONFIDENTIALITE	
Année 2025	
STAGIAIRE : BIN.....MOHAMAO.....1012AM.....Muhammad.....Hakim.....Farhan.....	
TITRE : Développement d'un Banc d'essai.....	
RESUME : Développement d'un Banc d'essai pour étudier..... les caractéristiques mécaniques de la pomme de terre.....	
.....	
Nombre de pages : 31..... Nombre de références bibliographiques : 2.....	
ENTREPRISE : Laboratoire ISM.....	
Président directeur général : Jean Marie LINARES.....	
Nombre d'employés :	
Domaine d'activité : Mécanique et biomécanique.....	
Adresse : 412 Av. Gaston Berger, 13090 Aix en Provence.....	
Téléphone : Télécopie :	
Tuteur industriel : Léon TADIRIST.....	
Fonction : Professeur à l'IUT AIX - MARSEILLE.....	
Mail : leontadirst@univ-amu.fr Téléphone : 04 91 63 93.....	
PARTIE A REMPLIR PAR LE TUTEUR INDUSTRIEL	
Accessibilité de ce rapport (entourer la mention correcte) :	
<input checked="" type="checkbox"/> LIBRE	CONFIDENTIEL pendant an(s)
Date : 18/06/2025..... Nom du stagiaire : BIN MOHAMAO..... Signature : 	

2. Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Laboratoire ISM (Institut des Sciences du Mouvement Étienne-Jules Marey) pour m'avoir offert l'opportunité d'effectuer mon stage au sein de ses équipes de recherche.

Je remercie tout particulièrement Monsieur Loïc Tadrist, mon tuteur de stage, pour son encadrement attentif, la qualité de ses conseils techniques ainsi que sa disponibilité constante tout au long de mon projet.

J'adresse également mes sincères remerciements à Monsieur Rémy Mazoyer, mon tuteur universitaire, pour son accompagnement pédagogique et le suivi rigoureux de mon stage.

Je souhaite remercier Louison Fiore et Paul Lacorre, membres du groupe de recherche, pour leur aide technique et leur disponibilité, qui ont grandement facilité l'avancée de mes travaux.

Enfin, je tiens à remercier Monsieur Guillaume Wolf pour son soutien indispensable à l'atelier, notamment lors de la fabrication des pièces mécaniques.

3. Sommaire

1.	Fiche d'identité et de confidentialité	2
2.	Remerciements	3
3.	Sommaire	4
4.	Introduction	5
5.	Présentation de l'entreprise	5
	I. Les équipes de recherche.....	5
	II. Implantation du laboratoire	6
6.	Présentation du stage	6
	I. Sujet du stage.....	6
	II. Démarche prévisionnelle et démarche réalisée	8
7.	Étude expérimentale	9
	I. Étude de la pomme de terre.....	9
	II. Préparation de l'expérience	12
	III. Réalisation de l'expérience	14
8.	Rapport technique – Conception et fabrication mécanique	17
	I. Conception de l'attache de pomme de terre	17
	II. Conception de l'attache fixée au capteur de force	19
	III. Système d'entraînement et de traction	21
	IV. Calibration du capteur	22
9.	Réalisation de l'expérience principale	24
10.	Résultats expérimentaux.....	26
	I. Comportement observé	26
	II. Analyse des courbes de traction	27
11.	Travaux complémentaires	29
	I. Conception d'adaptateurs pour moteur de remplacement	29
	II. Fabrication d'une seringue métallique par usinage conventionnel	30
12.	Conclusion.....	31
13.	Annexe 1 : Assemblage final du banc d'essai	32
14.	Annexe 2 : Fiche technique du capteur de force (Load Cell)	33
15.	Annexe 4 : Plan technique – Mors fixe pour attache Load Cell	34
16.	Annexe 5 : Plan technique – Mors mobile pour attache Load Cell	35
17.	Annexe 6 : Plan technique – Adaptateur pour fixation capteur de force	36

4. Introduction

Dans le cadre de ma formation en BUT Génie Mécanique et Productique, j'ai eu l'opportunité d'effectuer un stage d'application d'une durée de huit semaines, du 21 avril 2025 au 20 juin 2025. Ce stage a été réalisé au sein de l'Institut des Sciences du Mouvement Étienne-Jules Marey (UMR 7287), une unité mixte de recherche affiliée à Aix-Marseille Université et localisée à Marseille.

L'institut se consacre principalement à l'étude du mouvement humain et animal, intégrant des domaines tels que la biomécanique, et la bio-inspiration. Intégré au laboratoire, j'ai été chargé de concevoir un banc d'essai visant à analyser les propriétés mécaniques de la pomme de terre immergée dans différentes solutions de mannitol.

La mission qui m'a été confiée a mobilisé un ensemble de compétences théoriques et pratiques acquises au cours de ma formation, notamment :

- Un outil de gestion de projet : le cahier des charges
- Un logiciel de CAO : CATIA V5

Le présent rapport a pour objectif de présenter de manière structurée l'ensemble des travaux réalisés durant cette période. Dans un premier temps, une description détaillée de l'organisme d'accueil et de son fonctionnement sera proposée. Ensuite, seront abordées les différentes étapes du projet, depuis l'analyse du besoin jusqu'à la conception finale. Enfin, ce rapport s'achèvera par un bilan personnel mettant en lumière les compétences développées et les enseignements tirés de cette expérience professionnelle.

5. Présentation de l'entreprise

I. Les équipes de recherche

Le laboratoire est composé de 3 groupes de recherches. Chaque équipe a ses propres fonctions et missions dans lesquelles elle se spécialise. Voici les équipes :

- L'équipe BioMécanique/biolIngénierie (BMI)
- L'équipe Dynamiques Comportementales & Cognition (DynamCC)

- L'équipe Systèmes Bio Inspirés (SBI)

Parmi les trois groupes, je fais partie de l'équipe de SBI. Cette équipe a pour vocation de repousser les frontières de la connaissance scientifique sur le vivant afin d'inspirer l'innovation en ingénierie. Elle s'articule également sur deux axes de recherches, biorobotique et mécanismes bio-inspirés. Mon sujet de stage est basé sur l'axe mécanismes bio-inspirés qui est dirigé par M. loic TADRIST.

Cet axe de recherche se focalise sur l'élaboration de nouveaux algorithmes de conception destinés à l'industrie du futur, spécifiquement dans les domaines de la mécanique et de la biomécanique.

Les travaux de recherche de l'axe Mécanismes bio-inspirés sont orientés autour de trois thématiques de recherche :

- Structure de pièces bio-inspirée des os longs,
- Liaisons mécaniques bio-inspirées de la morphogenèse,
- Actionneurs et dissipateurs bio-Inspirés.

II. Implantation du laboratoire

Le laboratoire ISM se trouve à Avenue de Luminy F-13288, Marseille. Par ailleurs, il possède une antenne à Aix-en-Provence. Elle est précisément intégrée à l'IUT Aix-Marseille dans le département de Génie Mécanique et Productique (GMP).



Figure 1 IUT Aix-Marseille

6. Présentation du stage

I. Sujet du stage

Le stage s'est inscrit dans le cadre d'un projet de recherche plus large mené au sein de l'ISM, dont l'objectif principal est le développement d'un bras robotique synthétique s'inspirant des mécanismes de mouvements des végétaux, notamment le *pulvinus*. Ce

bras vise à simuler le fonctionnement des « muscles végétaux » en utilisant la pression de l'air ou de l'eau comme moyen d'actionnement.

Une des problématiques majeures identifiées par l'équipe SBI est de comprendre comment la pression interne influence la raideur des structures souples utilisées. Pour répondre à ce besoin explicitement formulé, les chercheurs ont initié une étude expérimentale visant à analyser le comportement mécanique d'un matériau biologique modèle : la pomme de terre.

Ce choix repose sur le fait que les cellules de parenchyme présentes dans la pomme de terre présentent un comportement similaire à celles du *pulvinus*, notamment leur capacité à se déformer sous l'effet de la pression osmotique. Les échantillons ont ainsi été immergés dans des solutions de mannitol de différentes concentrations afin d'induire une variation de leur teneur en eau, et donc de leurs propriétés mécaniques.

Ma mission s'inscrit directement dans ce besoin : j'ai été chargé de concevoir et de réaliser un banc d'essai mécanique capable de mesurer de manière fiable et répétable les propriétés mécaniques de ces échantillons biologiques, notamment leur module de Young. Ce dispositif permettra de mieux comprendre comment les matériaux cellulaires nous réagissent à des pressions variables, dans l'objectif d'optimiser le comportement du futur bras robotique.

Fonction	Exigence	Critère de performance
Maintien de l'échantillon	L'échantillon doit être fixé sans glisser ni se déformer excessivement	Système de serrage avec surface dentée, sans écrasement visible
Application de la force de traction	Force appliquée de façon régulière et contrôlée	Mouvement linéaire stable, piloté par moteur pas à pas
Mesure de la force exercée	Mesure de faibles forces générées par la pomme de terre (~0–300 g)	Capteur de force de haute précision avec résolution suffisante
Répétabilité de l'essai	L'expérience doit pouvoir être répétée dans des conditions identiques	Résultats cohérents entre plusieurs tests (écart-type < 10%)
Compatibilité avec l'environnement de recherche	Le système doit s'intégrer à l'infrastructure existante (Arduino, capteur, logiciel, etc.)	Câblage et montage compatibles avec modules HX711 et Arduino

Modularité et adaptabilité	Facilité d'ajustement à différents types d'échantillons	Fixation démontable, géométrie adaptable
----------------------------	---	--

II. Démarche prévisionnelle et démarche réalisée

Dans le but de mener à bien l'étude et la conception du banc d'essai, j'ai pris soin de structurer mon travail en différentes étapes logiques et cohérentes. Afin de réaliser ma mission dans de bonnes conditions, plusieurs ressources ont été mises à ma disposition :

- Un accès à des articles scientifiques publiés par monsieur Loïc Tadrist, me permettant de mieux comprendre le sujet de recherche.
- Les données expérimentales collectées par un ancien stagiaire ayant travaillé sur le comportement de la pomme de terre, notamment des courbes de croissance ainsi que le temps nécessaire pour atteindre une saturation maximale en solution.
- L'accompagnement de mon tuteur de stage ainsi que des chercheurs impliqués dans le projet, qui m'ont apporté un soutien technique et scientifique tout au long de la mission.

Une fois la mission bien comprise et analysée, j'ai pu établir un plan de travail détaillant les tâches à accomplir.

- Étude sur la pomme de terre (durée d'immersion optimale)
- Conception des différentes pièces
- Fabrication des pièces
- Remplacement du capteur de force
- Vérification du fonctionnement
- Amélioration de la conception
- Analyse des résultats

J'ai par la suite créé un diagramme de Gantt découpé en semaine afin de repartir ces différentes tâches sur la durée du stage :

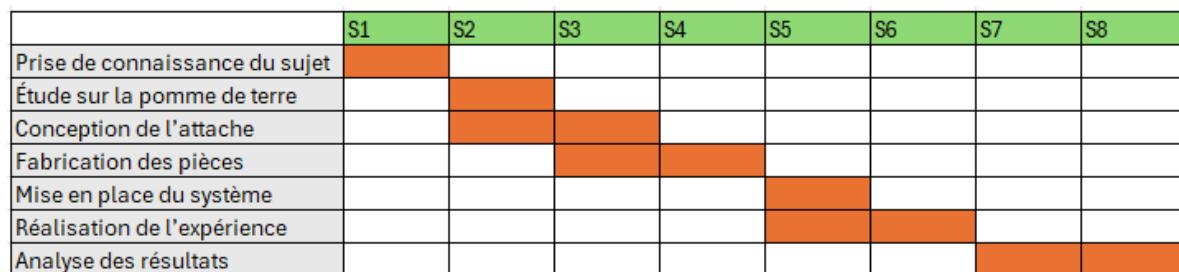


Figure 2 Diagramme Gantt prévisionnel

Sur ce graphique, une représentation des tâches telles qu'elles se sont réellement déroulées est présentée.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Prise de connaissance du sujet	Orange							
Étude sur la pomme de terre		Orange						
Conception de l'attache		Orange	Orange	Orange				
Fabrication des pièces			Orange	Orange	Orange			
Mise en place du système						Orange	Orange	
Réalisation de l'expérience								Orange
Analyse des résultats								Orange

Figure 3 Diagramme Gantt réel

Un décalage a été observé entre le planning initialement prévu et le déroulement réel du projet.

En effet, la phase de mise en place du système a été retardée en raison d'un problème technique : le moteur pas à pas (stepper motor) initialement prévu était défectueux.

Ce contretemps a nécessité le remplacement du moteur par un nouveau modèle, dont les dimensions et la configuration différaient.

Par conséquent, il a été nécessaire de concevoir et de fabriquer plusieurs pièces d'adaptation mécaniques pour permettre l'intégration du nouveau moteur au système existant.

Cette étape imprévue a entraîné un décalage dans le calendrier, repoussant le début de l'expérimentation, mais a permis d'assurer la fiabilité et la stabilité du montage final.

7. Étude expérimentale

I. Étude de la pomme de terre

D'après les études précédentes, les chercheurs ont analysé le temps nécessaire pour que les cellules de pomme de terre atteignent une expansion ou une contraction maximale. Cependant, nous avons dû répéter l'expérience car les spécimens utilisés dans notre cas avaient des dimensions différentes. En effet, les expérimentations antérieures ont été réalisées à partir de tranches de pomme de terre, tandis que nous avons utilisé des échantillons de forme cylindrique.



Figure 4 Tranches de pomme de terre utilisées lors du test préliminaire

Afin de garantir la précision des données obtenues, les échantillons de pomme de terre doivent être placés dans l'eau jusqu'à atteindre une expansion maximale. Cela permet de s'assurer que tous les spécimens présentent un niveau d'humidité identique avant leur immersion dans les solutions de mannitol.

Cependant, étant donné que l'expansion maximale nécessite un temps relativement long, nous avons décidé de standardiser le protocole en immergeant chaque spécimen dans l'eau pendant deux heures.

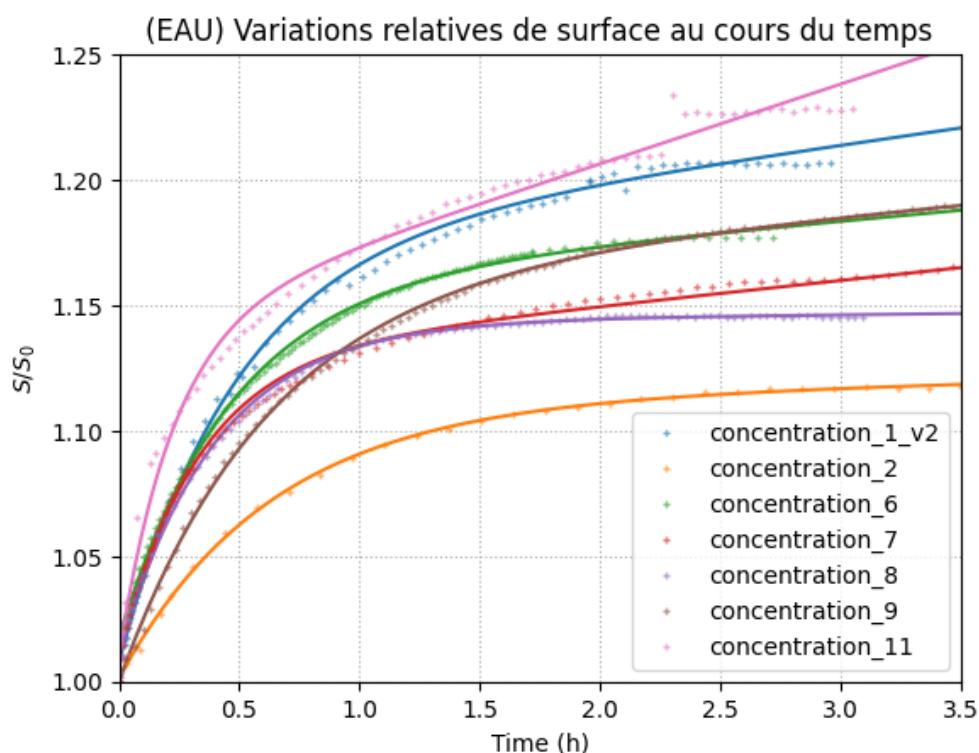


Figure 5 Courbe de déformation de la pomme de terre en fonction de la concentration de l'eau

Dans le cadre de notre sujet, nous avons utilisé différentes concentrations de mannitol, en suivant les mêmes valeurs que celles employées dans les expériences précédentes. D'après les données obtenues lors de ces expériences, nous avons constaté que, pour déterminer un temps d'immersion adapté permettant une contraction uniforme des échantillons de pomme de terre, il n'était nécessaire de répéter l'expérience que pour la concentration la plus élevée, soit 36 g/300 mL.

Concentrations de mannitol utilisées (en g/300 mL) :

- 3 g / 300 mL
- 6 g / 300 mL
- 9 g / 300 mL
- 12 g / 300 mL
- 15 g / 300 mL
- 18 g / 300 mL
- 21 g / 300 mL
- 24 g / 300 mL
- 27 g / 300 mL
- 30 g / 300 mL
- 33 g / 300 mL
- 36 g / 300 mL

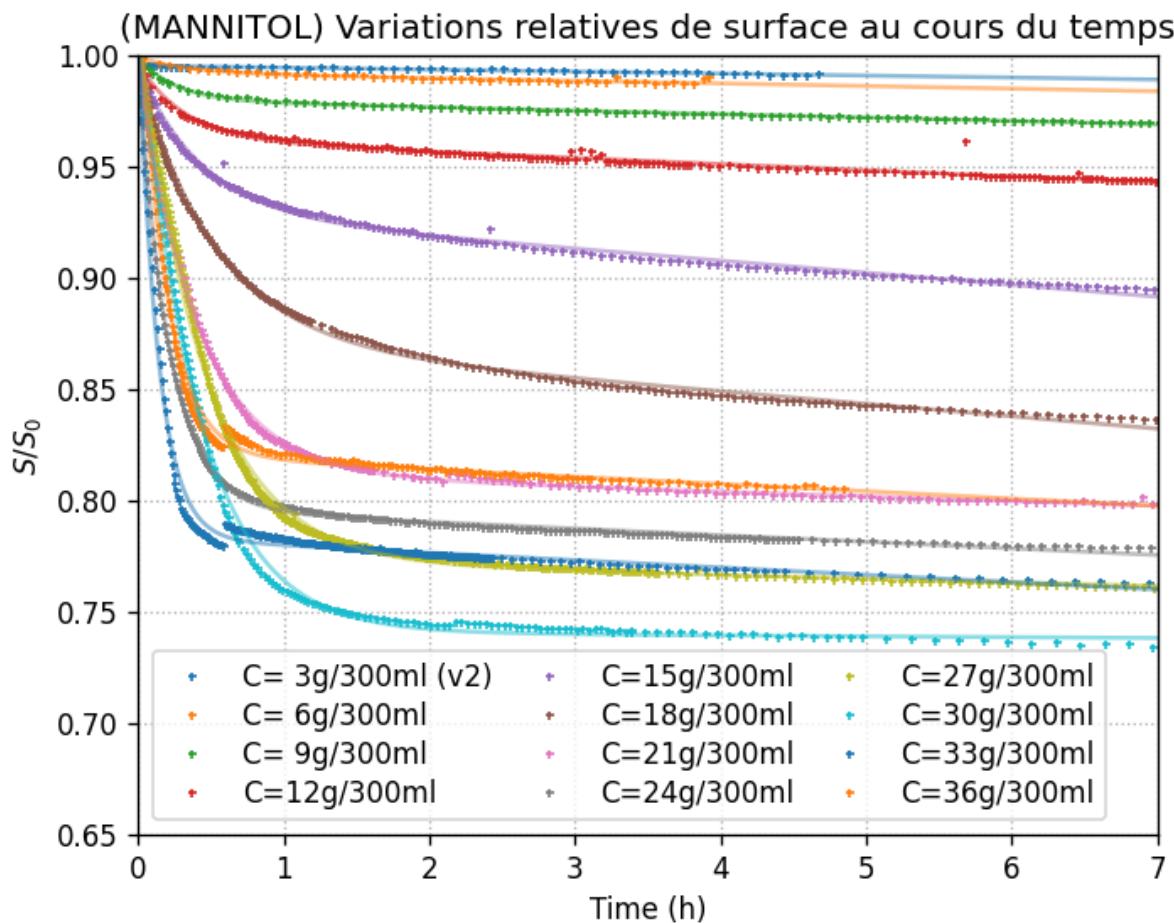


Figure 6 Courbe de déformation de la pomme de terre en fonction de la concentration en mannitol

II. Préparation de l'expérience

Préparation des échantillons

La première étape consistait à étudier la pomme de terre afin de déterminer la durée d'immersion optimale. Pour cela, nous avons utilisé des échantillons de pomme de terre découpés en forme de cylindres de 5 mm de diamètre et de 30 mm de longueur. Ces spécimens ont été obtenus à l'aide d'un tube métallique de type cylindrique (similaire à une paille rigide), possédant un diamètre intérieur de 5 mm.



Figure 8 Échantillon de pomme de terre immergé dans l'eau



Figure 8 Outil de coupe – vue de face



Figure 9 Échantillon de pomme de terre immergé dans l'eau

Cet outil, déjà disponible dans notre atelier, a été modifié en ébavurant son extrémité afin de le rendre tranchant et capable de pénétrer dans la pomme de terre pour en extraire les échantillons de manière précise.

Préparation des solutions de mannitol

Afin de garantir la précision des données obtenues, la préparation des solutions de mannitol a été réalisée avec le plus grand soin. Une balance analytique a été utilisée, et plusieurs précautions ont été prises :

- S'assurer que les portes de la balance analytique sont bien fermées pendant la pesée,
- Peser l'eau avec précision,
- Noter la masse de l'eau avant l'ajout du mannitol, puis après,
- Éviter toute perte de matière pendant le transfert.



Figure 10 utilisation balance analytic

Après la préparation des solutions, il est nécessaire de les laisser reposer pendant une journée entière afin d'assurer la dissolution complète du mannitol.

Cela permet d'éviter la présence de résidus blancs non dissous qui pourraient fausser les résultats obtenus par le système de capture d'images. En effet, une image est prise chaque minute et convertie en noir et blanc, la pomme de terre apparaissant en blanc.

Ainsi, la présence de particules blanches dans la solution risquerait d'interférer avec l'analyse de la taille réelle de l'échantillon.

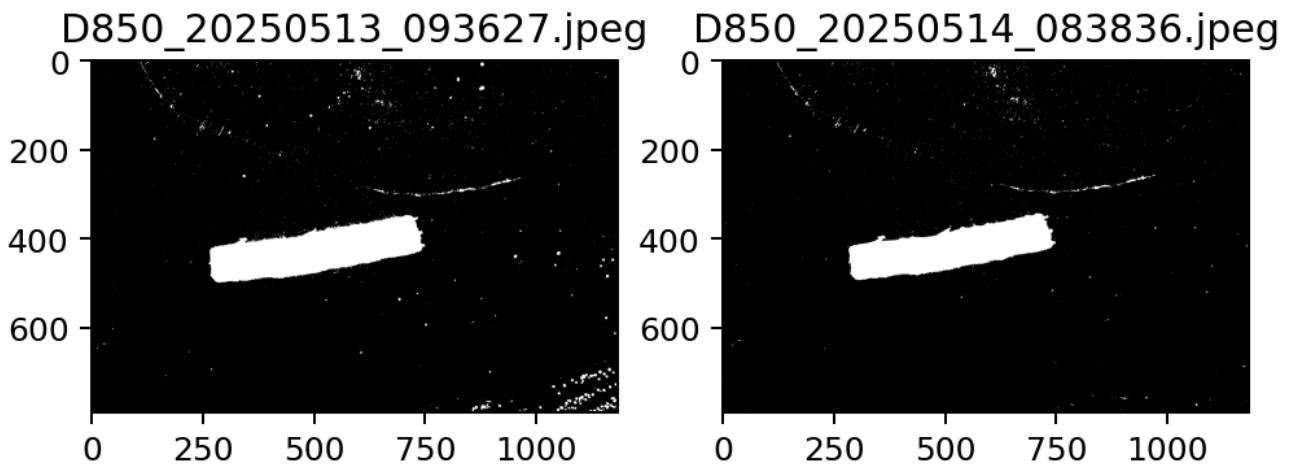


Figure 11 Conversion d'une image capturée en image noir et blanc pour le traitement de la surface visible de la pomme de terre

III. Réalisation de l'expérience

Immersion des échantillons

L'échantillon de pomme de terre a été entièrement immergé dans une solution de mannitol, placée dans un récipient en verre. Afin d'éviter tout déplacement de l'échantillon pendant l'expérience, une punaise a été utilisée comme système de fixation pour le maintenir en place.

Une fois l'échantillon installé, le programme de capture automatique d'images (une image par minute) devait être lancé immédiatement. Ensuite, la caméra devait être réglée afin d'assurer une résolution suffisante pour une analyse précise des images.

Système de capture d'images

Le système de capture d'image utilisé dans cette expérience a été mis en place afin de suivre l'évolution de la taille de l'échantillon de pomme de terre immergé dans une seule solution de mannitol.

Une caméra fixe, positionnée au-dessus du récipient en verre, prenait

automatiquement une photo toutes les 4 minutes, pendant une durée totale de 8 heures.

La programmation de ce système avait été réalisée en amont par un ancien stagiaire, ce qui nous a permis de lancer directement l'enregistrement dès le début de l'immersion.

Les images capturées étaient ensuite converties en noir et blanc, permettant une détection claire de l'échantillon (en blanc) sur un fond sombre, facilitant ainsi le traitement et l'analyse de la variation de surface au cours du temps.

Afin d'assurer une condition de lumière constante pendant toute la durée de l'expérience, un système d'éclairage LED (voir image ci-dessous) a été réglé à intensité maximale.

Cette expérience d'imagerie n'a pas pour but de mesurer les propriétés mécaniques des échantillons, mais plutôt d'observer la cinétique de leur contraction osmotique. Grâce à un programme préexistant, chaque image capturée est automatiquement convertie en noir et blanc, ce qui permet d'extraire la surface visible de l'échantillon à chaque instant.

Cette analyse permet ainsi de suivre avec précision la réduction de taille de la pomme de terre au cours du temps, et d'en déduire le moment où l'échantillon atteint un état stable — autrement dit, un équilibre osmotique. Une fois ce temps caractérisé, il devient possible d'uniformiser la préparation de tous les échantillons destinés aux tests de traction.

Ce protocole d'observation constitue donc une étape préalable indispensable à ma mission principale : concevoir un banc d'essai fiable. Il assure que tous les échantillons testés possèdent des conditions initiales homogènes, rendant les résultats mécaniques plus reproductibles et exploitables pour l'étude des propriétés biomécaniques du tissu.



Figure 12 Environnement contrôlé pour le traitement d'image des échantillons de pomme de terre

L'ensemble du dispositif a été placé dans une boîte noire fermée afin d'éliminer toute interférence lumineuse extérieure.

Résultats expérimentaux

Le graphique ci-dessous montre l'évolution de la surface visible de l'échantillon de pomme de terre au cours du temps, normalisée par rapport à sa surface initiale. On observe une diminution rapide de la surface au début de l'immersion, suivie d'une stabilisation progressive.

En analysant l'évolution de la surface visible des échantillons de pomme de terre au cours du temps, nous avons constaté que celle-ci se stabilise après environ 9 heures d'immersion. Cette phase de plateau indique que les cellules ont atteint un état d'équilibre osmotique, où la teneur en eau ne varie plus significativement.

Par conséquent, nous avons défini une durée optimale d'immersion de 9 heures, avant le transfert des échantillons dans les solutions de mannitol, afin de garantir une homogénéité initiale entre tous les spécimens testés.

Cette homogénéisation préalable est indispensable pour assurer la validité des essais mécaniques réalisés par la suite sur le banc d'essai.

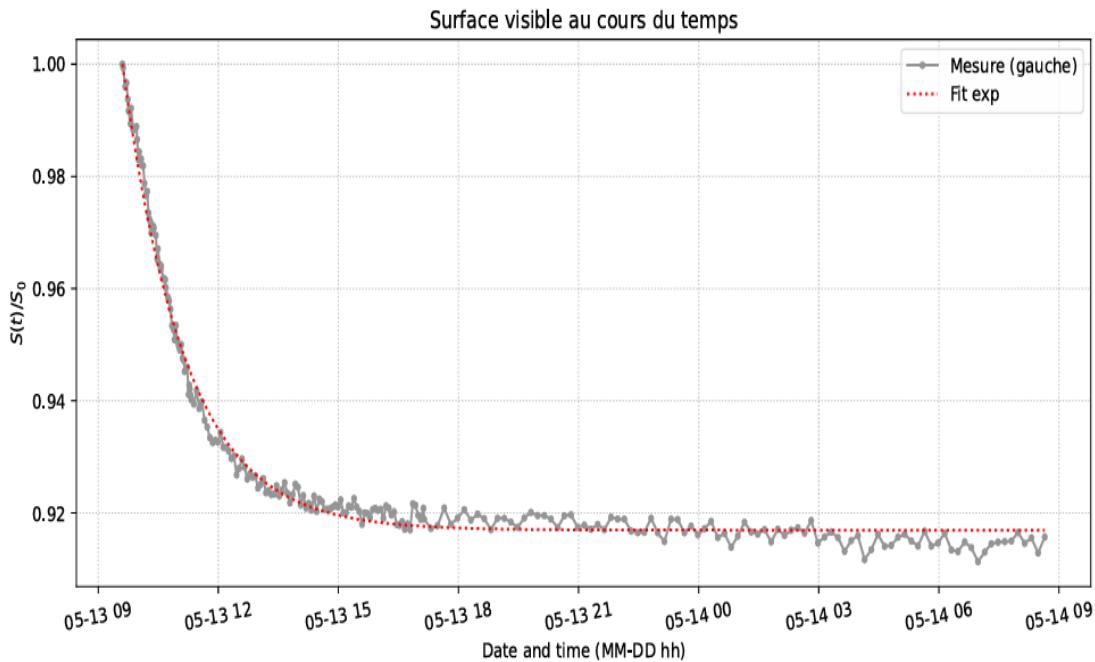


Figure 13 Surface relative (S/S_0) extraite par traitement de l'image noir et blanc des échantillons

8. Rapport technique – Conception et fabrication mécanique

I. Conception de l'attache de pomme de terre

Cette attache constitue une pièce spécifique essentielle, conçue pour maintenir le spécimen de pomme de terre, qui est de petite taille et déformable.

Pour répondre aux exigences du montage expérimental, nous avons conçu deux types d'attaches différentes. La première attache est fixée sur la platine mobile : c'est elle qui effectue le mouvement. La seconde attache reste statique et est fixée directement au capteur de force.

Développement de la pièce d'attache

Le développement de la pièce d'attache s'est déroulé en plusieurs étapes, allant du prototype initial à la version finale utilisée pour l'expérience.

Dans un premier temps, un prototype simple a été conçu afin de tester la faisabilité de la fixation de l'échantillon de pomme de terre. Ce premier modèle avait pour but de valider les dimensions et la méthode de maintien, tout en respectant la déformabilité de l'échantillon.

Pour la version finale, la pièce d'attache a été divisée en deux parties distinctes, destinées à être assemblées lors de l'installation finale.

- La première partie est fixée à la structure du banc d'essai,

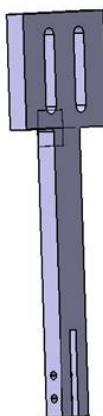


Figure 14 Attache support

- Tandis que la seconde est directement attachée à l'échantillon de pomme de terre.

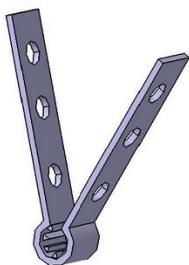


Figure 15 Attache sur pomme de terre

Afin d'assurer une bonne tenue de la pomme de terre sans l'endommager, cette seconde pièce a été conçue en s'inspirant du fonctionnement d'une pince. Nous avons ajouté des dents sur toute la surface fonctionnelle de contact, permettant ainsi une fixation stable et efficace tout en tenant compte de la déformabilité du matériau.

Quant à la pièce fixée sur le support du banc d'essai, nous y avons intégré une ouverture en forme de cercle allongé afin de permettre le réglage en hauteur de l'attache selon la position de l'échantillon.

Les deux pièces ont été conçues pour être assemblées à l'aide d'un écrou et d'une vis, assurant ainsi une fixation stable, tout en permettant un démontage et un ajustement faciles si nécessaire.

Fabrication des pièces

Les deux pièces de l'attache ont été fabriquées en utilisant des méthodes de production différentes, adaptées à leurs fonctions et exigences respectives.

La pièce munie de dents, en contact direct avec la pomme de terre, a été réalisée par impression 3D résine à l'aide d'une imprimante Formlabs, avec le matériau Grey V4. Ce choix a été motivé par la nécessité d'obtenir une surface fonctionnelle précise, lisse et bien détaillée, compte tenu de la présence des dents et de la petite taille de la pièce. La résine permettait également un excellent niveau de finition, essentiel pour assurer une fixation efficace sans endommager l'échantillon.

La pièce liée au support du banc d'essai, quant à elle, a été fabriquée par découpe laser dans une plaque d'acrylique de 10 mm d'épaisseur. Ce matériau a été choisi pour sa rigidité, garantissant ainsi une bonne stabilité mécanique et une tenue fiable pendant toute la durée des essais.

II. Conception de l'attache fixée au capteur de force

Le système d'attache du côté du capteur de force ne pouvait pas être identique à celui utilisé sur le support.

En effet, une conception symétrique aurait impliqué l'ajout d'un bras de levier, ce qui aurait nécessité des calculs supplémentaires pour corriger les moments introduits et garantir la précision de la mesure.

Pour éviter cette complexité, nous avons opté pour une conception simplifiée et directe, spécifiquement adaptée au capteur.

La pièce a été conçue de manière à transmettre la force de façon axiale et sans décalage, en s'adaptant parfaitement à un capteur de force de type single point.

Ce choix garantit une lecture fiable et directe de l'effort appliqué sur l'échantillon, tout en limitant les sources d'erreurs potentielles liées à la géométrie de la fixation.



Figure 16 Capteur de force 300g

Conception mécanique

La conception de cette pièce d'attache s'est inspirée du fonctionnement d'un étau de fraisage, mais adaptée à notre usage avec un système de serrage par vis et écrou. L'objectif était de maintenir fermement l'échantillon sur le capteur de force tout en assurant une structure démontable, stable, et facile à ajuster.

Pour cela, la pièce a été divisée en trois composants principaux :

- La première partie est fixée directement au capteur de force et sert de base de montage,

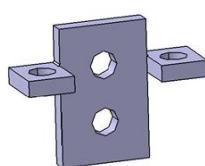


Figure 17 Adaptateur mécanique fixé sur le capteur de force

- La deuxième partie, immobile, est fixée sur la première et contribue à la stabilité de l'ensemble,

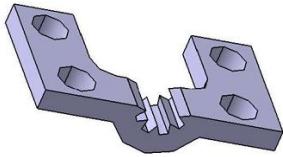


Figure 18 Partie immobile

- La troisième partie, mobile, exerce la pression sur l'échantillon à l'aide d'un système vis-écrou.

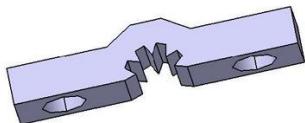


Figure 19 Partie mobile

Afin d'assurer une meilleure adhérence avec la pomme de terre, des dents ont été ajoutées sur les surfaces fonctionnelles des pièces 2 et 3, en contact direct avec l'échantillon.

Cela permet de répartir la force de serrage tout en évitant que l'échantillon ne glisse pendant les essais de traction.

Fabrication des pièces

L'ensemble des pièces du système de serrage a été fabriqué par impression 3D en résine à l'aide d'une imprimante Formlabs, en utilisant le matériau Grey V4. Ce procédé a été sélectionné afin de garantir une grande précision dimensionnelle, indispensable pour l'ajustement entre les composants, ainsi que pour la qualité des surfaces fonctionnelles, notamment celles comportant des dents destinées à maintenir fermement l'échantillon.

Les trois pièces ont été conçues pour s'emboîter de manière précise et être assemblées par vis et écrous, assurant ainsi une fixation stable tout en permettant un démontage facile en cas de besoin.

Cette méthode de fabrication a permis de respecter les tolérances nécessaires au bon fonctionnement du système tout en offrant une finition adaptée à un usage mécanique de petite échelle.



Figure 20 les attaches



Figure 21 Assemblage des composants

mécaniques sur le capteur de force

III. Système d’ entraînement et de traction

Le mouvement de traction dans le banc d’essai est assuré par un actuateur linéaire industriel déjà disponible au laboratoire (Figure 22). Cet actuateur permet un déplacement précis et régulier de la platine mobile sur un axe horizontal, en exerçant une traction directe sur l’échantillon.

Le système repose sur un moteur pas à pas intégré, commandé par une carte Arduino Uno associée à un driver Mycom UPS5003. Le mouvement est programmé via Arduino pour permettre des déplacements linéaires contrôlés, à vitesse constante ou variable selon les paramètres expérimentaux.

L’axe de translation repose sur une glissière linéaire protégée par un soufflet, assurant la stabilité du mouvement sans interférence mécanique extérieure. Ce mécanisme assure une traction répétable et contrôlée sur les échantillons biologiques testés.

Sur la platine mobile, un bloc noir rigide (Figure 23) est fixé pour accueillir le système d’attache. Cette configuration garantit un alignement précis avec le capteur de force et une bonne transmission de l’effort.

En complément, une structure en tôle pliée (Figure 24) a été conçue pour servir de plateforme stable permettant de poser les contenants de solution mannitol pendant les phases d’immersion.

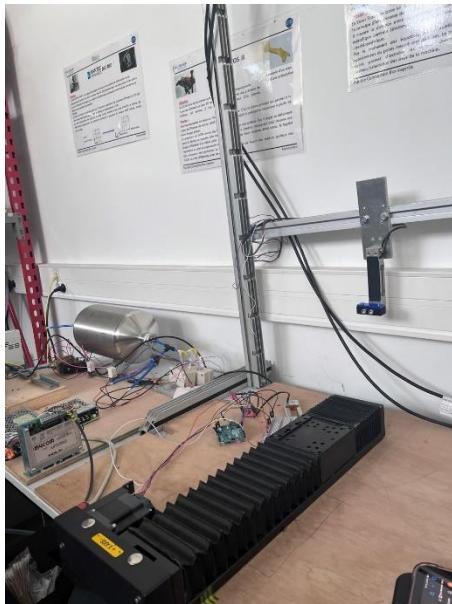


Figure 22 Vue d'ensemble du banc d'essai avec l'actuateur linéaire

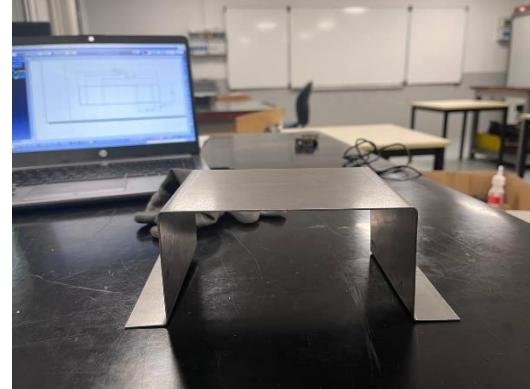


Figure 23 Support en tôle pliée pour contenants d'immersion



Figure 24 Bloc rigide fixé sur la platine mobile

IV. Calibration du capteur

Remplacement et calibration du capteur de force

Le banc d'essai utilisé était initialement équipé d'un capteur de force de 7 kg, intégré au système.

Cependant, ce capteur s'est avéré inadapté à la faible plage de force générée par les échantillons de pomme de terre lors des essais de traction.

Pour cette raison, nous avons procédé au remplacement du capteur existant par un capteur plus sensible de 300 g, offrant une meilleure précision de mesure.

Après l'installation, le nouveau capteur a été calibré manuellement à l'aide de poids étalonnés.

La calibration a permis de déterminer un facteur de conversion entre le signal brut délivré par le module HX711 et la force réelle en grammes.

Schéma de câblage

Le système de mesure comprend :

- un capteur de force 300 g,
- un amplificateur HX711,
- une carte Arduino Uno,

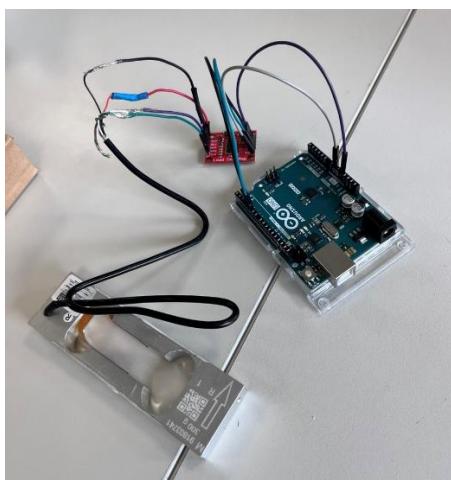


Figure 25 Schéma de câblage complet

Programme Arduino

Le code utilisé repose sur la bibliothèque HX711.

Il permet la lecture continue des données issues du capteur, l'application du facteur de calibration, et l'affichage des résultats sur le moniteur série.

```
loadcell.ino
33
34  #include "HX711.h"
35
36  #define DOUT 3
37  #define CLK 2
38
39 HX711 scale;
40
41 float calibration_factor = -611000;
42
43 void setup() {
44     Serial.begin(9600);
45     Serial.println("HX711 calibration sketch");
46     Serial.println("Remove all weight from scale");
47     Serial.println("After readings begin, place known weight on scale");
48     Serial.println("Press + or a to increase calibration factor");
49     Serial.println("Press - or z to decrease calibration factor");
50
51     scale.begin(DOUT, CLK);
52     scale.set_scale();
53     scale.tare(); //Reset the scale to 0
54
55     long zero_factor = scale.read_average(); //Get a baseline reading
56     Serial.print("Zero factor: "); //This can be used to remove the need to tare the scale. Useful in permanent scale projects.
57     Serial.println(zero_factor);
58 }
59
60 void loop() {
61     scale.set_scale(calibration_factor); //Adjust to this calibration factor
62 }
```

```
loadcell.ino
 51 scale.begin(DOUT, CLK);
 52 scale.set_scale();
 53 scale.tare(); //Reset the scale to 0
 54
 55 long zero_factor = scale.read_average(); //Get a baseline reading
 56 Serial.print("Zero factor: "); //This can be used to remove the need to tare the scale. Useful in permanent scale projects.
 57 Serial.println(zero_factor);
 58 }
 59
 60 void loop() {
 61
 62 scale.set_scale(calibration_factor); //Adjust to this calibration factor
 63
 64 Serial.print("Reading: ");
 65 Serial.print(scale.get_units()*100, 1);
 66 Serial.print(" g"); //Change this to kg and re-adjust the calibration factor if you follow SI units like a sane person
 67 Serial.print(" calibration_factor: ");
 68 Serial.print(calibration_factor);
 69 Serial.println();
 70 delay(500);
 71 if(Serial.available())
 72 {
 73     char temp = Serial.read();
 74     if(temp == '+' || temp == 'a')
 75         calibration_factor += 1000;
 76     else if(temp == '-' || temp == 'z')
 77         calibration_factor -= 1000;
 78 }
 79 }
```

Figure 26 Script Arduino pour capteur de force

9. Réalisation de l'expérience principale

Comme mentionné précédemment, l'objectif de cette expérience était d'étudier le comportement mécanique de la pomme de terre en fonction de la concentration de la solution de mannitol.

Bien que la plage initiale de concentrations s'étendait de 3 g à 36 g pour 300 mL, nous avons décidé de limiter l'étude à quatre concentrations représentatives : 0 g, 10 g, 20 g et 30 g.

Pour chaque concentration, sept spécimens de pomme de terre différents ont été testés, soit un total de 28 échantillons.

Préparation des échantillons

Afin de garantir une humidité initiale homogène pour l'ensemble des spécimens, les 28 échantillons ont été immergés dans de l'eau distillée pendant une nuit entière.

Ils ont ensuite été transférés dans leur solution respective de mannitol et y sont restés pendant 3 heures pour permettre l'absorption ou la perte d'eau par osmose avant le test mécanique.



Figure 27 Immersion dans des solutions de mannitol variées

Déroulement de l'expérience

Chaque série d'essais, correspondant à une concentration donnée, a duré environ 2 heures, incluant l'installation, la traction et la remise à zéro du système.

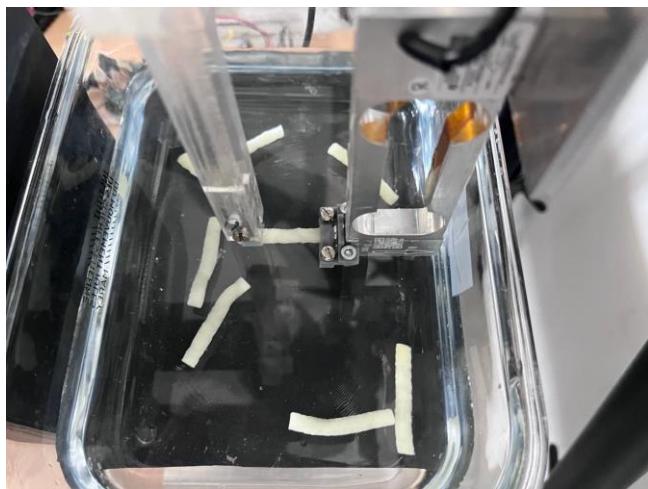


Figure 28 Expérience en cours

Pendant les tests de traction, plusieurs paramètres ont été ajustés, notamment :

- Le temps de palier, c'est-à-dire la durée pendant laquelle la traction est maintenue à une position fixe avant relâchement,
- La distance de chaque traction, autrement dit l'allongement appliqué à chaque cycle.

Ces paramètres ont été volontairement modifiés dans le but d'observer l'influence de ces variations sur les résultats.

En particulier, nous avons cherché à analyser comment les différentes valeurs du temps de palier et de la distance de traction affectaient la forme des courbes obtenues, ainsi que le comportement mécanique global des échantillons.

10. Résultats expérimentaux

I. Comportement observé

Au cours des essais de traction, plusieurs comportements mécaniques des échantillons de pomme de terre ont été observés.

Dans la majorité des cas, la rupture de l'échantillon s'est produite au niveau de l'attache fixée au capteur de force. Cette zone semble concentrer une contrainte suffisante pour provoquer la casse.

Cependant, dans certains cas, la rupture a eu lieu du côté de l'attache mobile, bien que cela ait été moins fréquent.



Figure 29 Échantillon de pomme de terre après rupture

Il a également été noté que dans quelques essais, l'échantillon ne s'est pas cassé, mais a plutôt glissé légèrement hors de l'attache. Ce phénomène de glissement était rare, et observé principalement lorsque le temps de palier était court (20 à 30 secondes).

Dans ces conditions, la traction étant rapide, l'échantillon n'avait pas le temps de se stabiliser ou de se déformer pleinement avant la montée en charge.

En revanche, lorsque le temps de palier a été augmenté à 90 secondes, un comportement très spécifique a été systématiquement observé : tous les échantillons ont glissé hors de l'attache avant même de se casser, rendant les mesures inutilisables. Cela suggère que des temps de palier trop longs provoquent un relâchement progressif de l'adhérence entre l'attache et la pomme de terre, probablement dû à la nature déformable et humide de l'échantillon.

Ces observations confirment que la configuration mécanique et les paramètres temporels du test influencent fortement la manière dont l'échantillon réagit à l'effort appliqué.

II. Analyse des courbes de traction

Comme illustré sur la figure ci-dessous, le graphique présente les résultats de l'expérience réalisée sur sept échantillons de pomme de terre différents, tous soumis à la même concentration de 10 g de mannitol pour 300 mL de solution, avec un temps de palier fixé à 30 secondes.

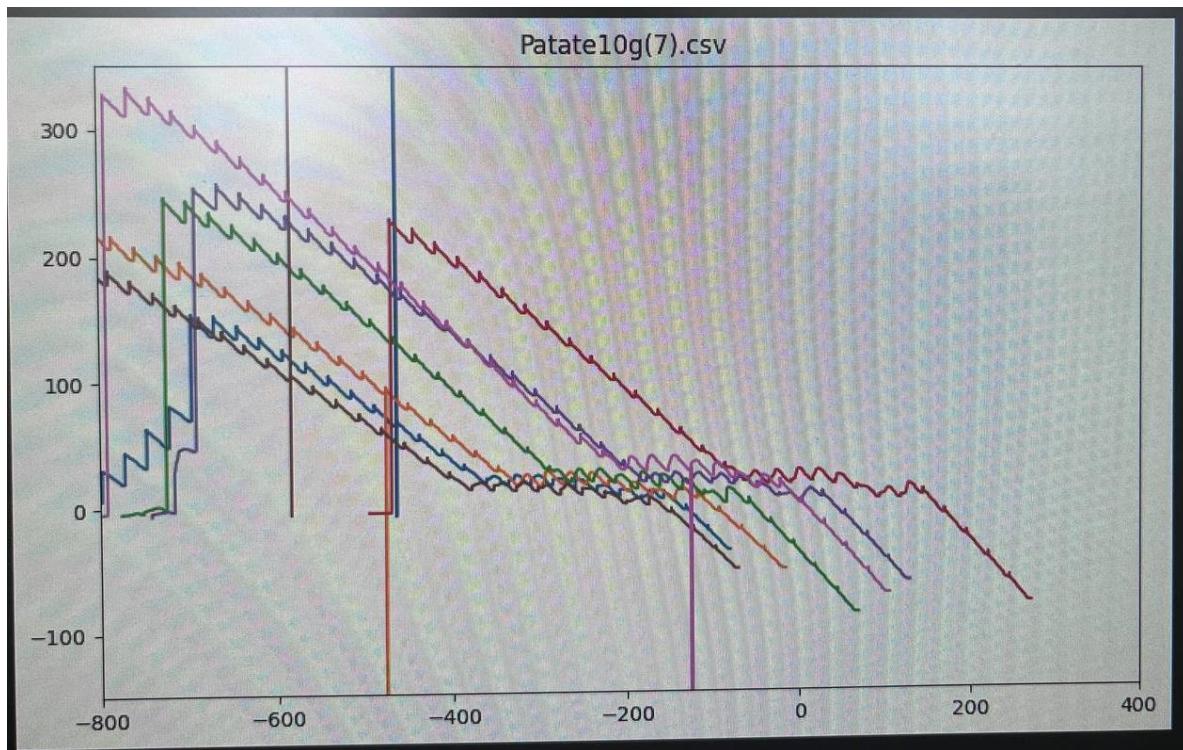


Figure 30 Résultats de l'expérience

Les courbes obtenues montrent une tendance générale cohérente, caractérisée par une augmentation progressive de la force jusqu'à un pic maximal, suivie d'une chute brutale correspondant à la rupture ou au glissement de l'échantillon.

Bien que la forme globale des courbes soit similaire, des variations dans l'amplitude de la force maximale et dans la position du pic sont observées d'un échantillon à l'autre. Ces différences traduisent la variabilité intrinsèque du matériau biologique, influencée par la densité cellulaire, la teneur en eau ou d'autres propriétés mécaniques internes propres à chaque spécimen.

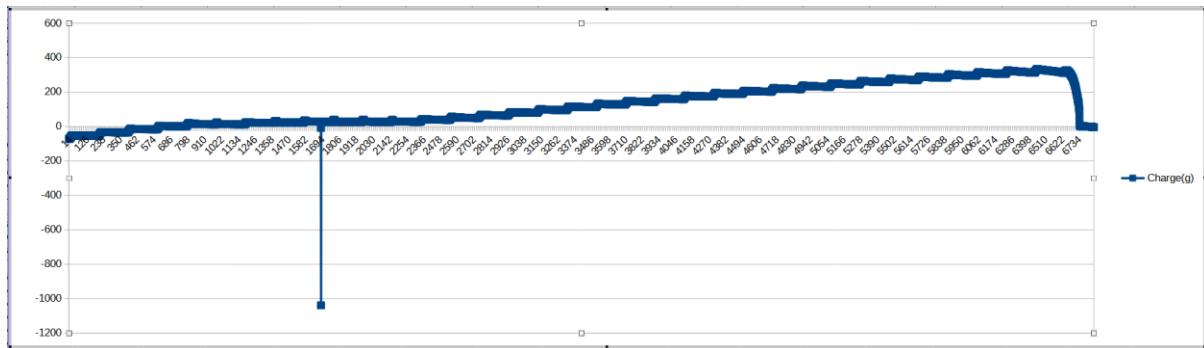


Figure 31 Courbe de traction d'un échantillon (temps de palier : 90 s)

En revanche, lorsque le temps de palier est augmenté à 90 secondes (Figure 31), un comportement différent est observé.

À chaque phase de repos, on remarque une diminution progressive de la force mesurée, indiquant que la pomme de terre tend à revenir lentement vers sa forme initiale après avoir été étirée.

Ce relâchement partiel suggère un comportement viscoélastique du matériau, où la déformation n'est pas parfaitement maintenue dans le temps.

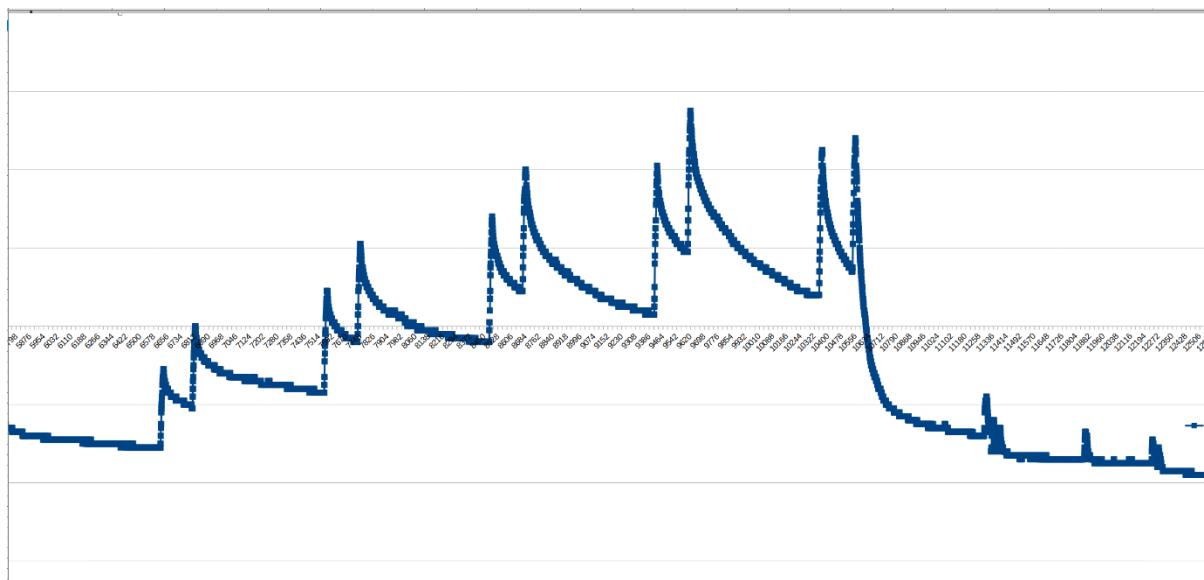


Figure 32 Zoom sur la courbe précédente, montrant les cycles de relâchement progressif

La Figure 32 représente un agrandissement d'une portion du graphe précédent, permettant de visualiser plus clairement cette diminution cyclique de la force après chaque extension.

Ce phénomène se traduit par une courbe finale plus étalée et relativement plate, avant que l'échantillon ne glisse complètement hors de l'attache, sans rupture nette.

11. Travaux complémentaires

I. Conception d'adaptateurs pour moteur de remplacement

Au cours du stage, une tâche complémentaire m'a été confiée en dehors du sujet principal : la modification mécanique du système de banc d'essai, suite au remplacement du moteur initial, devenu inutilisable. L'intégration du nouveau moteur a nécessité la conception et la fabrication de trois pièces adaptatrices spécifiques, afin d'assurer une compatibilité mécanique avec les éléments existants du dispositif.



Figure 33 Assemblage adaptateur pour moteur

1. Adaptateur de fixation du moteur sur le banc d'essai

Cette pièce permet de maintenir solidement le nouveau moteur en place. Elle a été fabriquée en deux versions :

- une première par fraisage à commande numérique,
- une seconde en impression 3D, en raison de l'indisponibilité temporaire des machines d'usinage et des contraintes de temps.

2. Adaptateur d'axe moteur

Le nouvel axe moteur étant plus petit que l'ancien, un adaptateur a été nécessaire pour assurer une liaison mécanique fiable.

Cette pièce a été :

- tournée sur un tour conventionnel pour le corps principal,

- et usinée par fraisage CNC pour créer un méplat de contact.
Le transfert de couple est réalisé à l'aide de deux vis sans tête sous pression.

3. Support de l'encodeur

Enfin, un troisième adaptateur a été conçu pour permettre le positionnement de l'encodeur sur le nouveau moteur.

Cette pièce, de fonction purement de support, a été réalisée par découpe laser, étant donné la simplicité géométrique et les faibles contraintes mécaniques de l'assemblage.

II. Fabrication d'une seringue métallique par usinage conventionnel

En parallèle des missions principales du stage, une tâche complémentaire m'a été confiée : reproduire une seringue plastique standard en version métallique, afin d'en améliorer la résistance mécanique et la durabilité.

Le modèle d'origine (Figure 35) était une seringue jetable en plastique souple, dont l'usage répétitif dans certaines expériences entraînait une usure rapide.

L'objectif était donc de concevoir un équivalent en aluminium, usiné manuellement à l'aide d'un tour conventionnel, tout en conservant les dimensions fonctionnelles du modèle d'origine.

Plusieurs pièces ont été usinées :

- le corps de la seringue, en tube plein d'aluminium tourné
- le piston, muni d'un joint torique pour assurer l'étanchéité
- un capuchon fileté, pour faciliter l'assemblage (Figure 34)



Figure 35 Seringue plastique d'origine



Figure 36 Pièces usinées en aluminium



Figure 34 Pièces usinées en aluminium (corp)

12. Conclusion

Ce stage avait pour objectif principal la réalisation d'une machine de traction destinée à l'étude des propriétés mécaniques de la pomme de terre, dans le cadre d'un projet de recherche en biomécanique végétale. L'ensemble des travaux a nécessité une implication multidisciplinaire, allant de la conception mécanique à l'expérimentation physique, en passant par la fabrication de pièces techniques et la mise en place d'un protocole d'essai adapté.

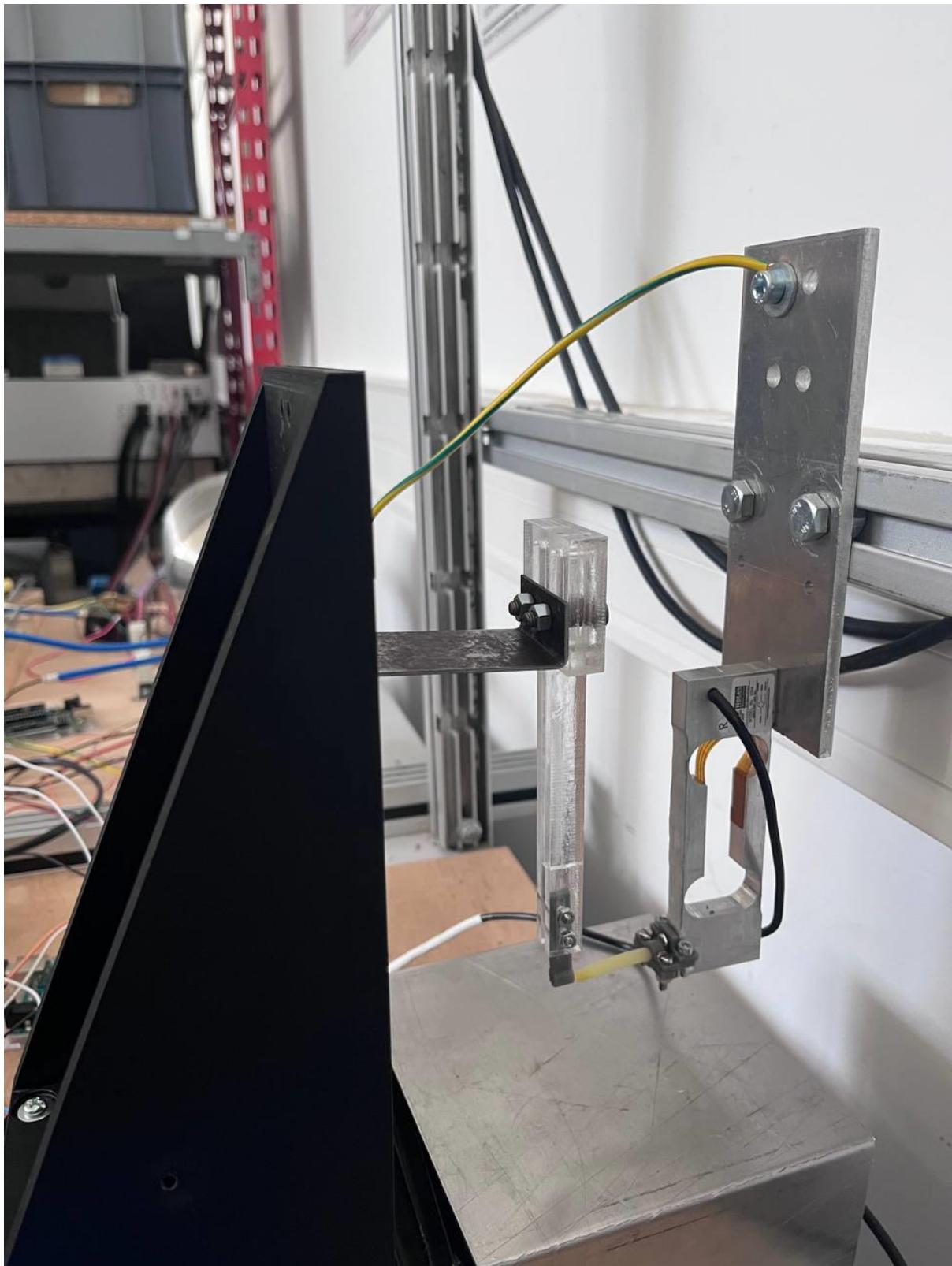
D'un point de vue technique, ce stage m'a permis de consolider et de mettre en pratique l'ensemble des compétences acquises durant ma formation, notamment en conception assistée par ordinateur (CAO), en usinage conventionnel (fraisage et tournage) ainsi qu'en usinage à commande numérique (CNC). J'ai également participé activement à l'assemblage du système et à l'analyse des données expérimentales.

Cependant, plusieurs contraintes techniques ont perturbé l'avancement du projet. En particulier, la panne du moteur d'origine a entraîné un décalage important dans le calendrier prévu, ce qui a limité le nombre d'essais réalisés. Faute de temps, seule la concentration de 10 g/300 mL de mannitol a pu être testée expérimentalement, alors que les concentrations de 20 g et 30 g étaient également prévues. Par conséquent, l'analyse comparative entre différentes conditions osmotiques n'a pas pu être menée à bien.

Il est également important de noter que certaines erreurs de ma part lors de la conception initiale des adaptateurs pour le nouveau moteur ont contribué à ce retard. Des imprécisions techniques ont nécessité des ajustements supplémentaires, ce qui a réduit davantage le temps disponible pour la réalisation complète de l'expérimentation.

Dans le cadre d'une éventuelle poursuite du projet, plusieurs axes d'amélioration peuvent être envisagés. L'un des problèmes majeurs identifiés est le glissement de l'échantillon hors de l'attache lors des essais de traction. Une optimisation de la géométrie de l'attache, notamment par l'ajout de dents supplémentaires et l'augmentation de la surface de contact avec la pomme de terre, permettrait d'assurer un meilleur maintien de l'échantillon et ainsi, d'améliorer la qualité et la précision des mesures. Ces améliorations contribueraient à une meilleure reproductibilité des résultats et renforcerait la fiabilité globale du dispositif expérimental.

13. Annexe 1 : Assemblage final du banc d'essai



14. Annexe 2 : Fiche technique du capteur de force (Load Cell)

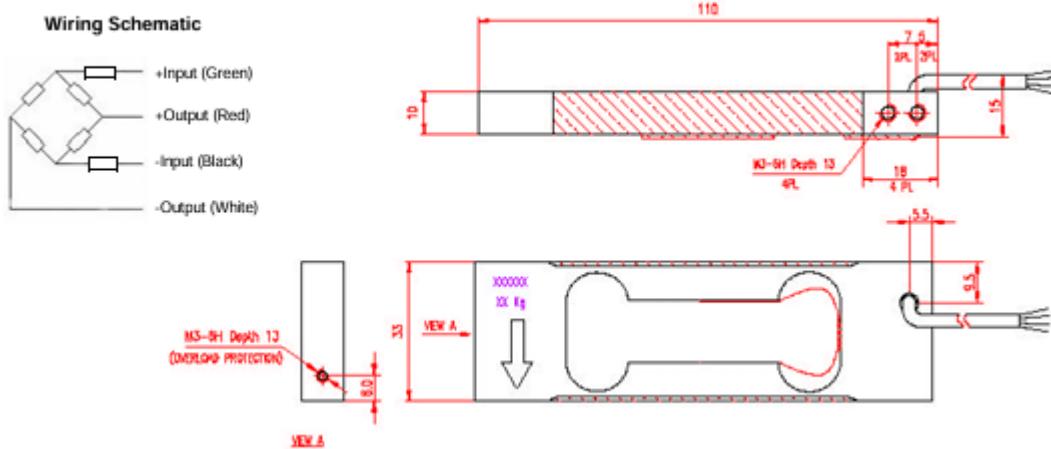
Model 1004

Single Point Load Cells

GRADE	JW	UNITS
Rated Capacity	0.3, 0.6, 1.5, 3	kg
Rated Output	0.9 ±0.1	mV/V
Rated Output Tolerance	0.1	± mV/V
Zero Balance	0.04	± mV/V
Total Error (at constant room temperature)	0.0067	±% of Rated Output
Zero Return (creep) in 2 minutes	0.0033	±% of Applied Load
Temperature Effect: On Zero	0.004	±% of Rated Output/°C
Temperature Effect: On Output	0.002	±% of Applied Load/°C
Eccentric loading error	0.0033	±% of Load / cm
Maximum recommended platform size	20 by 20	cm
Temperature Effect: Compensated	+5 to +45	°C
Temperature Effect: Safe	-30 to +70	°C
Maximum Safe Static Overload (central loading)	150	% of Rated Capacity
Ultimate Static Overload (central loading)	250	% of Rated Capacity
Excitation: Recommended	10	VAC or VDC rms
Excitation: Maximum	15	VAC or VDC rms
Input Impedance	415 ± 20	Ohms
Output Impedance	350 ± 3	Ohms
Insulation Resistance	>2000	MegaOhms
Deflection of Rated Capacity (Central Loading)	<0.4	mm
Cable Length	0.4	m
Weight (nominal)	0.06	kg
Cable Type	0.4 m, 4-wire, 28 AWG, spiral shield, PVC jacket	
Color Code	+exc-grn, +sig-red -exc-blk, -sig-wht	
Construction	Aluminum	
Platform Size	200 x 200	mm
Compensation Circuit Type	Balanced	
Environmental Protection	IP66	
Outline Dimension Drawings	273.000.00-3	

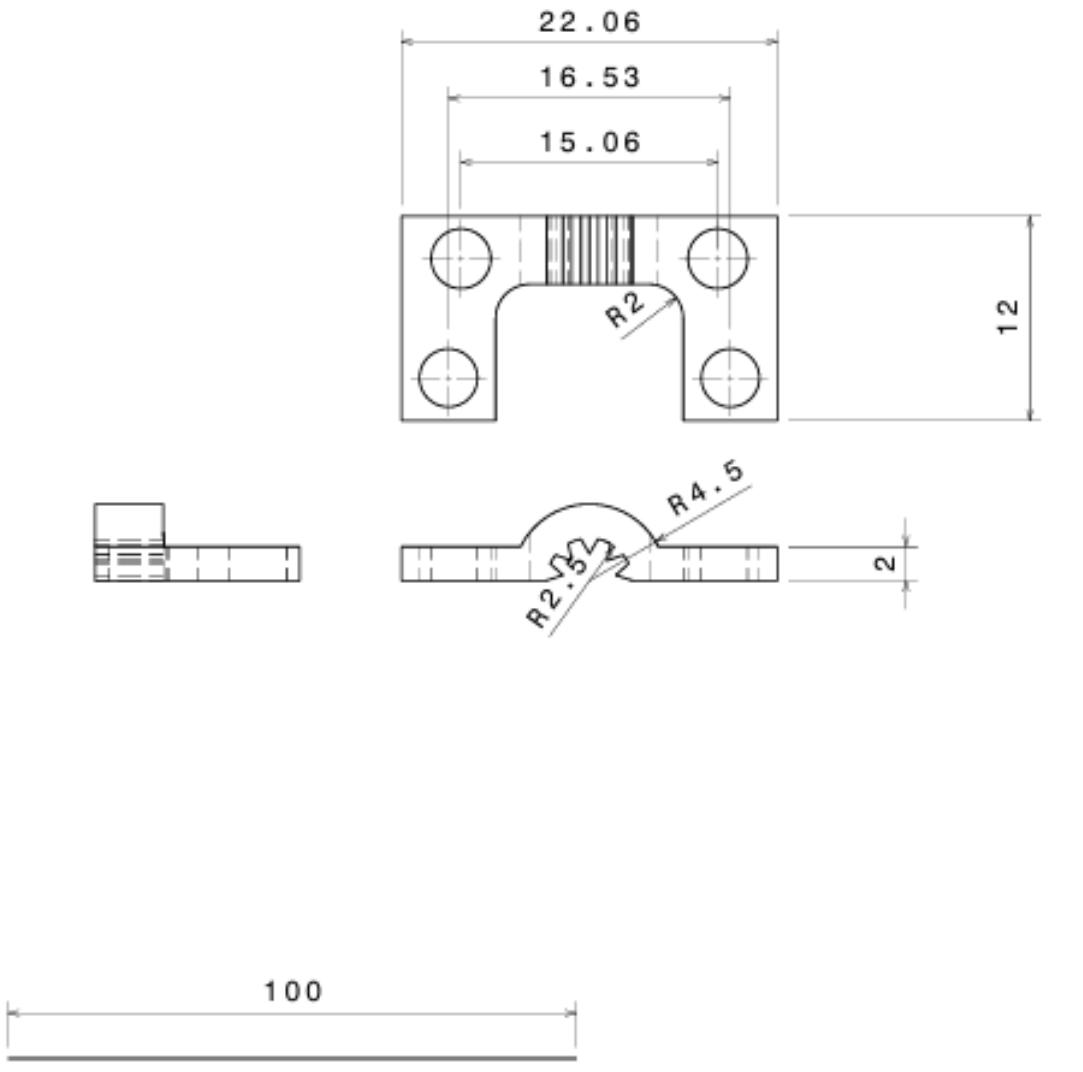
Recommended bolt fixing torque L 1.4nm (1.0 lbf.ft)

Outline Dimensions All Capacities (in mm)



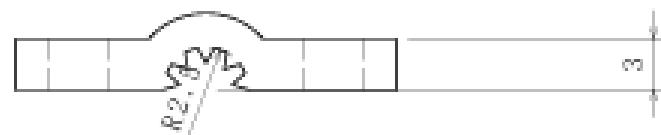
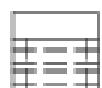
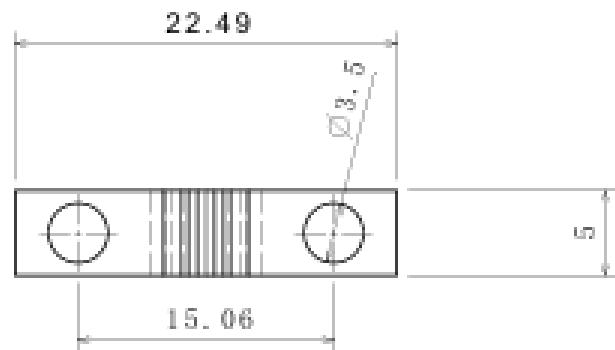
15. Annexe 4 : Plan technique – Mors fixe pour attache

Load Cell



Ensemble : Attache loadcell	Echelle : Ech	N° N°	
Mors fixe	Nom : Hakimi	IUT - GMP	
Non du fichier : NOM DU FICHIER	Date : Date	AIX EN PROVENCE	Tol. Gén : ISO 2768...

16. Annexe 5 : Plan technique – Mors mobile pour attache Load Cell



Ensemble : Attache loadcell	Echelle : Ech	N°N°	
Mors mobile	Nom : Hakimi	IUT - GMP	AIX EN PROVENCE
Nom du fichier : NOM DU FICHIER	Date : Date	Tol. Béb : ISO 2768...	

17. Annexe 6 : Plan technique – Adaptateur pour fixation capteur de force

