

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبو بكر بلكايد - تلمسان

تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie biomédical

Spécialité : électronique et maintenance biomédicale

Par : ZAIT RAMZI ELMEHDI et SERSAR MOHAMED AYMEN ABDELHADI

Sujet

Conception d'une maquette de simulation d'examen clinique d'un abdomen douloureux

Soutenu publiquement, le /10/2025, devant le jury composé de :

M SOULIMANE SOUFIANE
M KHOLKHALE MOURAD
M FANDI BASSIM
M LOTFI HAMZA CHERIF
Mme ATEBI AMINA

Professeur Université de Tlemcen
Professeur Université de Tlemcen
MCA Université de Tlemcen
Professeur Université de Tlemcen
Professeur Université de Tlemcen

Président
Examinateur
Encadrant
Co-Encadrant
Expert sociaux
économique

Année universitaire :2024 /2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

قال الله تعالى: "يَرْفَعِ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ"

الآية " 11 المجادلة"

Remerciements

Ce mémoire représente l'aboutissement d'un long parcours académique, marqué par l'apprentissage, la persévérance et la collaboration. Sa réalisation n'aurait pas été possible sans l'appui, le soutien et la contribution de nombreuses personnes qui ont, chacune à leur manière, participé à cette aventure scientifique et humaine.

Nos remerciements à l'ensemble des enseignants du Génie Biomédical, dont l'engagement et le dévouement ont permis de développer nos compétences et d'élargir nos horizons scientifiques.

Nous tenons à exprimer notre sincère reconnaissance à notre encadrant monsieur FANDI BASSIM, pour son accompagnement, ses conseils éclairés et la confiance qu'il nous a accordée. Sa disponibilité et ses orientations précises ont été des atouts précieux tout au long de la conception et de la réalisation de ce projet.

Nos remerciements s'étendent également à notre Co-encadrant monsieur LOTFI HAMZA CHERIF, pour ses remarques constructives et son implication qui ont grandement contribué à l'amélioration de ce travail.

Une gratitude particulière est adressée aux membres du jury messieurs SOULIMANE SOFIANE et KHOLKHAL MOURAD, pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire. Leur disponibilité, leurs critiques constructives et leurs suggestions pertinentes représentent une véritable source d'enrichissement et participent à l'amélioration continue de ce projet.

Des remerciements tout particuliers sont adressés à nos familles.

À nos parents, pour leur amour inconditionnel, leur patience et leurs sacrifices constants. Leur confiance et leur soutien indéfectible ont constitué une source de force et de motivation tout au long de ces années.

À nos frères et sœurs, pour leurs encouragements et leur présence réconfortante dans les moments de doute et de fatigue.

Nos amis les plus proches méritent également notre gratitude, pour leurs sourires, leurs paroles rassurantes et leur soutien moral, qui ont apporté de la lumière et de la sérénité lors des périodes les plus exigeantes.

Ce mémoire est le reflet d'un chemin parcouru ensemble, soutenu par l'effort collectif, la solidarité et la persévérance.

À toutes celles et ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à cette aventure, nous adressons nos plus sincères remerciements.

Dédicace

*À toutes celles et ceux qui ont, d'une manière ou d'une autre, marqué ce parcours,
offert leur présence, leurs mots ou leurs silences,
et donné à ce projet un sens plus profond que celui d'un simple mémoire.*

À ma mère,

*Pour ton amour infini, ton soutien sans faille et ta tendresse silencieuse.
Tu es cette lumière douce qui a toujours su guider mes pas, même dans les ténèbres.
Tes prières ont été mon refuge, et ta force a été mon inspiration.
Chaque réussite est une part de toi, car sans ton courage et tes sacrifices, rien de tout cela
n'aurait été possible.*

À mon père,

*Pour ta force tranquille et ton regard qui m'a toujours poussé à avancer.
Ta sagesse et ta confiance m'ont appris la persévérance et le sens du devoir.
Tu as été ce roc solide sur lequel j'ai pu m'appuyer dans les moments de doute.
Ton fierté est devenue ma motivation la plus profonde.*

À mes frères et ma sœur,

*Pour votre présence rassurante, vos rires et vos encouragements.
Vous êtes ces repères précieux qui m'ont rappelé, à chaque étape, que je ne suis jamais seul.
Votre soutien a rendu ce chemin plus doux et plus lumineux,*

À mes amis ABDELMOUNAIM, WAÏL, SIDÉAHMED, ABELREZAK et Les autres,

*Pour vos sourires, vos rires et votre amitié sincère.
Vous avez été la lumière dans les jours sombres et la force dans les moments d'épuisement.*

Merci pour chaque mot, chaque encouragement et chaque instant partagé qui a rendu ce parcours plus humain et plus joyeux.

À mon binôme AYMEN,

Pour ton engagement, ta rigueur et ton esprit de collaboration.

Ce projet a été un véritable travail d'équipe, et le chemin parcouru à deux lui a donné une dimension unique et enrichissante.

Merci pour ton soutien et ta détermination tout au long de cette aventure.

Enfin,

À toutes celles et ceux qui ont cru en moi, même lorsque les obstacles semblaient insurmontables.

*Ce mémoire est bien plus qu'un projet académique :
c'est un témoignage de persévérance, de solidarité et de rêves partagés.*

ZAIT RAMZI ELMAHDI

Dédicace

Derrière chaque page de ce travail se cachent des visages, des sourires et des mains tendues. Il me tient à cœur de dédier ces lignes à celles et ceux qui ont été mon pilier, ma source de motivation et de joie durant cette aventure.

À mes parents, pour leur amour sans faille et leurs sacrifices qui ont pavé chaque étape de mon parcours

À mes frères de cœur, Ahmed, Zakaria et Yassine, pour tous les fous rires, les soutiens inconditionnels et les bons souvenirs qui ont rendu ce chemin bien plus joyeux

À mon amie Manel, pour sa présence constante. Merci d'avoir été mon ancre et ma confidente tout au long de cette aventure.

Pour Achouak,

Merci pour ton soleil, ton audace et tous les moments de joie pure.

À mon binôme Mehdi, pour son sérieux, sa patience et notre excellente collaboration tout au long de ce projet.

Sersar Mohamed Aymen Abdelhadi

Résumé

La formation en médecine exige des outils pédagogiques modernes permettant aux étudiants et aux professionnels de santé de s'exercer dans un environnement sûr et réaliste. L'examen clinique de l'abdomen douloureux représente une étape essentielle du diagnostic médical, mais son apprentissage est souvent limité par l'accès restreint aux mannequins de simulation, généralement coûteux et importés.

Ce projet a pour objectif la conception et la réalisation d'une **maquette interactive** destinée à simuler l'examen clinique d'un abdomen douloureux. On a essayé de fournir une solution la plus réaliste, accessible et simple d'utilisation, permettant aux apprenants de s'entraîner à détecter et interpréter des signes cliniques tels que la **douleur**, **la défense abdominale et la contracture musculaire**, sans risque pour les patients.

Mots-clés : Simulation médicale – Examen clinique – Abdomen douloureux – Maquette interactive – Formation médicale

ملخص

تتطلب دراسة الطب أدوات تعليمية حديثة تمكّن الطلبة والمهنيين في مجال الصحة من التدريب في بيئة آمنة وواقعية. يُعدّ الفحص السريري للبطن المؤلم خطوة أساسية في التشخيص الطبي، غير أن تعلمه غالبًا ما يكون محدودًا بسبب قلة توفر دمي المحاكاة، التي تكون عادةً باهظة الثمن ومستوردة.

يهدف هذا المشروع إلى تصميم وإنجاز نموذج تفاعلي مخصص لمحاكاة الفحص السريري للبطن المؤلم. وقد سعينا إلى توفير حل يتميز بالواقعية وسهولة الاستخدام وإمكانية الوصول، مما يتيح للمتعلمين التدريب على اكتشاف وتفسير العلامات السريرية مثل الألم، الدفاع العضلي للبطن.

الكلمات المفتاحية: المحاكاة الطبية – الفحص السريري – البطن المؤلم – نموذج تفاعلي – التكوين الطبي.

Abstract

Medical training requires modern educational tools that allow students and healthcare professionals to practice in a safe and realistic environment. The clinical examination of the painful abdomen is a key step in medical diagnosis, but its learning is often limited by restricted access to simulation mannequins, which are usually expensive and imported.

This project aims to design and develop an interactive model intended to simulate the clinical examination of a painful abdomen. We sought to provide a solution that is as realistic, accessible, and user-friendly as possible, enabling learners to train in detecting and interpreting clinical signs such as pain, abdominal guarding, and muscle rigidity, without any risk to patients.

Keywords: Medical simulation – Clinical examination – Painful abdomen – Interactive model – Medical training.

Table des matières

I.	Chapitre 1 : De l'anatomie à la simulation clinique d'abdomen	5
I.1	Introduction :	5
I.2	Anatomie de l'abdomen :	6
I.2.1	Définition de l'abdomen :	6
I.2.2	Les régions de l'abdomen :	6
I.2.3	Projection des organes sur la paroi abdominale :	7
I.3	Examen clinique abdominal :	8
I.3.1	L'inspection	8
I.3.2	Auscultation.....	10
I.3.3	Percussion abdominale	11
I.3.4	Palpation abdominale : méthode et rôle dans le diagnostic des douleurs.....	11
I.4	Les signes physiologiques observés lors de la palpation abdominale	14
I.4.1	La douleur abdominale	14
I.4.2	La défense abdominale	17
I.4.3	La contracture	18
I.5	Simulation médicale	18
I.5.1	L'intérêt de simuler la douleur, défense et contracture abdominales.....	21
I.6	Défis techniques de la simulation des douleur abdominales :	23
I.7	État de l'art :	23
I.7.1	Introduction :	23
I.7.2	Le brevet WO2014145013A1.....	24
I.7.3	Le brevet CN112652206A.....	25
I.7.4	Comparaison des brevets	25
I.7.5	Avantages et limites.....	26
I.8	La conception d'un scénario :	26
I.9	Récapitulation.....	30
II.	Chapitre 02 : De l'idée à la conception de la maquette interactive	32
II.1	Préambule	32
II.2	La collecte et l'exploration des idées pour la conception de la maquette	33
II.3	Conception de la maquette interactive	36
II.3.1	Simulation de l'abdomen humain.....	36

II.3.2	Simulation de douleur et défense abdominale	38
II.3.3	Simulation de la contracture musculaire.....	48
II.4	Récapitulation	50
III.	Chapitre 03 : Réalisation pratique de prototype	52
III.1	Conception et moulage de la couche de silicone	52
III.2	Assemblage et câblage du circuit électronique	57
III.3	Calibration et validation des capteurs	61
III.3.1	Calibration de capteur de région d'épigastre.....	61
III.3.2	Calibration de capteur de région hypocondre droite	64
III.3.3	Calibration de capteur de région hypocondre gauche	65
III.3.4	Calibration de capteur de région ombilicale.....	66
III.3.5	Calibration de capteur de région Flanc droit	67
III.3.6	Calibration de capteur de région Flanc gauche	68
III.3.7	Calibration de capteur de région hypogastre.....	69
III.3.8	Calibration de capteur de région fosse iliaque droite	70
III.3.9	Calibration de capteur de région fosse iliaque gauche	71
III.4	Interface graphique	73
III.5	Assemblage de prototype.....	74
III.6	Fonctionnement de prototype.....	77
III.7	Tests et validation	81
III.7.1	Les scénarios des tests :.....	82
III.7.2	Résultat :.....	82
III.8	Discussion critique et perspectives	86
III.8.1	Discussion	86
III.8.2	Comparaison avec l'état de l'art.....	88
III.9	Récapitulation	91
	93
	Business Model Canvas.....	93
IV.	Chapitre 04 : Business Model Canvas.....	94
IV.1	Introduction.....	94
IV.2	Les blocs de BMC.....	94
IV.2.1	Proposition de valeur.....	94
IV.2.2	Segments de clients	96
IV.2.3	Relation avec les clients	97
IV.2.4	Canaux de distribution	97

IV.2.5	Partenaires clés.....	98
IV.2.6	Activités clés.....	99
IV.2.7	Ressources clés.....	100
IV.2.8	Charges et coûts.....	101
IV.2.9	Revenus.....	102
IV.3	Récapitulation.....	103
V.	Chapitre V : Perspectives.....	105

Liste des figures

Figure 1:les régions de l'abdomen [2]	7
Figure 2 [4] : L'inspection	9
Figure 3 [4] : Auscultation.....	10
Figure 4 [4] : Percussion abdominale.....	11
Figure 5 [5] : palpation profonde.....	12
Figure 6 [2] : Les zones de Head.....	15
Figure 7 [7] : les diagnostics on fonction du douleurs abdominales	16
Figure 8 [4] : simulateurs-patients.....	20
Figure 9 [9] : simulateurs virtuels sur ordinateur	21
Figure 10 : maquettes de centre de simulation médical de faculté de médecine de Tlemcen	34
Figure 11 : mannequin de présentation vestimentaire [15].....	37
Figure 12 : couche d'éponge [16].....	37
Figure 13 : silicone liquide 15 A [16].....	38
Figure 14 : système global.....	38
Figure 15 [25] : Arduino Méga.....	40
Figure 16 [16] : ATmega2560	40
Figure 17 : capteur FSR.....	41
Figure 18 [18] :DFplayer mini	43
Figure 19 [18] : le branchement de DFplayer mini avec Arduino et haut-parleur	43
Figure 20 [4] : piles lithium-ion	45
Figure 21 [4] : LM7805.....	46
Figure 22 Schéma fonctionnel du dispositif.....	48
Figure 23 : base de maquette	52
Figure 24 : fabrication de moule	53
Figure 25 : résultat finale de moule.....	53
Figure 26 : versement de silicone et mettre de l'éponge sur le moule	55
Figure 27 : mise on place des sangles	56
Figure 28 : couverture par bandage	56
Figure 29 : résultat finale.....	57
Figure 30 : circuit finale	60

Figure 31: emplacement des capteurs et moteur sur la maquette	60
Figure 32 : Mesures enregistrées pour la région épigastrique lors des palpations superficielles et profondes	61
Figure 33 : courbe de résistance de FSR on fonction de force [23]	62
Figure 34 : Mesures enregistrées pour la région de l'hypochondre droit lors des palpations superficielles et profondes	64
Figure 35 : Mesures enregistrées pour la région de l'hypochondre gauche lors des palpations superficielles et profondes	65
Figure 36 : Mesures enregistrées pour la région ombilicale lors des palpations superficielles et profondes	66
Figure 37 : Mesures enregistrées pour la région du flanc droit lors des palpations superficielles et profondes	67
Figure 38 : Mesures enregistrées pour la région du flanc gauche lors des palpations superficielles et profondes	68
Figure 39 : Mesures enregistrées pour la région hypogastrique lors des palpations superficielles et profondes	69
Figure 40 : Mesures enregistrées pour la région de la fosse iliaque droite lors des palpations superficielles et profondes	70
Figure 41 : Mesures enregistrées pour la région de la fosse iliaque gauche lors des palpations superficielles et profondes	71
Figure 42 : le logo	73
Figure 43 : emplacement de première couche d'éponge et les capteurs et moteurs dans la maquette	75
Figure 44 : application de deuxième couche d'éponge	75

Liste des Tableaux

Tableau 1 : comparaison entre état d'art.....	26
Tableau 2 : Les résultats de seuil de palpation superficielle et profonde de toutes les régions	73
Tableau 3 : Résultats du questionnaire de satisfaction	83
Tableau 4 : Résultats de la grille d'observation.....	83

Liste des annexes

Annexe 1:écran d'accueil.....	113
Annexe 2:écran principale.....	113
Annexe 3:Questionnaire de satisfaction	114
Annexe 4:grille d'observation.....	115



Introduction générale

La formation médicale est un domaine où la théorie seule ne suffit pas. Pour devenir compétent, un futur médecin doit s'entraîner sur des gestes cliniques précis, apprendre à reconnaître des signes subtils et développer une sensibilité tactile et relationnelle auprès des patients. Parmi ces gestes, l'examen clinique de l'abdomen occupe une place essentielle. Cet examen, bien que courant, est souvent difficile à maîtriser, car il peut révéler des pathologies très variées, allant de simples troubles fonctionnels à des affections graves nécessitant une prise en charge urgente.

Cependant, l'apprentissage de cet examen se heurte à plusieurs obstacles. D'abord, il existe une contrainte éthique : faire examiner un patient réel par un grand nombre d'étudiants peut être source de gêne et d'inconfort, surtout lorsqu'il s'agit de douleurs abdominales aiguës. Ensuite, les occasions d'examiner des cas cliniques variés restent limitées dans les hôpitaux, ce qui freine l'acquisition de l'expérience nécessaire. Enfin, la peur de commettre des erreurs lors des premiers contacts avec des patients peut constituer un frein à l'apprentissage pratique.

Face à cette problématique, une question centrale se pose : **comment permettre aux étudiants en médecine d'acquérir, dans un cadre sûr et respectueux de l'éthique, les compétences nécessaires à l'examen clinique de l'abdomen douloureux, tout en garantissant un apprentissage progressif et efficace ?**

L'hypothèse retenue est que la mise en place d'une maquette de simulation interactive permettrait de combler ce manque. En offrant une alternative aux patients réels, un tel dispositif pourrait assurer une pratique répétée et diversifiée, sans risque ni contrainte éthique, et préparer les étudiants à affronter la réalité clinique avec plus de confiance et de précision.

Dans notre pays, où les centres de simulation demeurent encore rares et souvent dépendants de matériels importés coûteux, la conception d'un simulateur local et accessible représente une avancée significative. En proposant une solution innovante et adaptée aux réalités du système de santé algérien, ce travail entend démocratiser l'accès à la simulation médicale et renforcer la qualité de la formation des futurs médecins. Ainsi, ce prototype ne constitue pas seulement un outil d'apprentissage, mais également un pas vers une modernisation durable de la pédagogie médicale dans le pays.

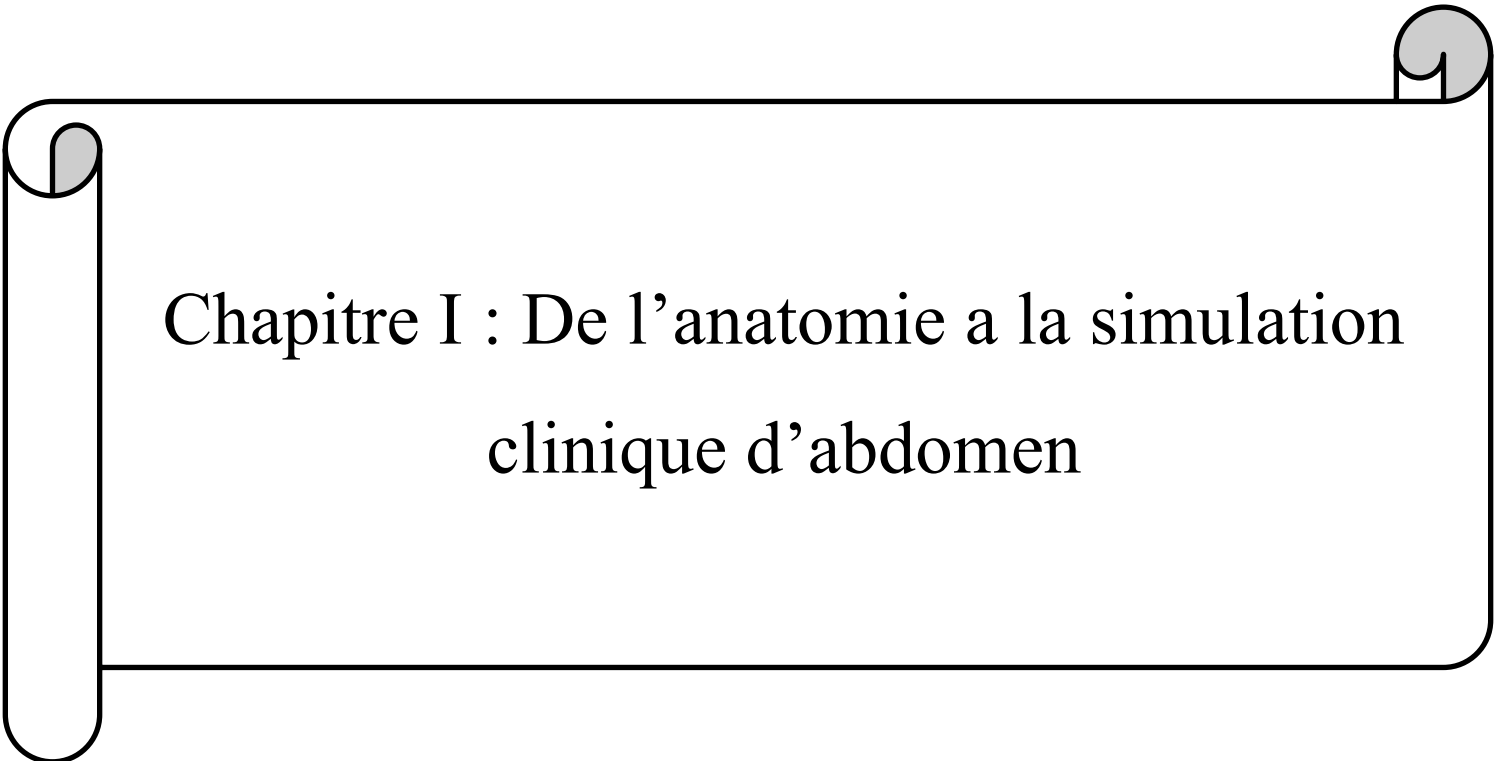
Les objectifs de ce projet s'inscrivent dans cette logique. L'**objectif principal** est de fournir un outil pédagogique fiable, capable de reproduire de manière la plus réaliste possible certaines réactions abdominales et de permettre aux étudiants de s'entraîner sans risque. L'**objectif secondaire** consiste à obtenir un label de validation, afin d'ouvrir la voie à une production et une commercialisation future de la maquette, pour une utilisation plus large dans les facultés et centres de formation.

Ainsi, ce travail ne se limite pas à la réalisation technique d'un prototype, mais s'inscrit dans une démarche plus globale visant à améliorer la pédagogie médicale en Algérie, à la rendre plus moderne, plus accessible et plus respectueuse des enjeux éthiques de la formation.

Ce projet intègre également une réflexion sur sa **viabilité et son déploiement à grande échelle**. À cet effet, un **Business Model Canvas (BMC)** a été élaboré afin d'identifier les ressources, les coûts, les partenariats et les stratégies nécessaires pour assurer la diffusion et la pérennité du dispositif dans les facultés de médecine et les centres de formation continue. Cette démarche permet de placer le projet dans une perspective à long terme, en envisageant son intégration durable dans les programmes pédagogiques et son rôle dans le développement du secteur de la simulation médicale en Algérie.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre présente l'anatomie de l'abdomen et met en évidence le rôle de la simulation clinique dans la formation médicale. Le deuxième chapitre est consacré à la conception de la maquette, en décrivant les étapes qui ont permis de définir son architecture et ses fonctionnalités. Le troisième chapitre porte sur la réalisation du prototype et les tests menés pour en vérifier la fiabilité et l'efficacité. Enfin, le quatrième chapitre est exclusivement dédié au Business Model Canvas (BMC), qui expose les aspects organisationnels et stratégiques liés au développement et à la mise en valeur du projet.

En somme, ce mémoire retrace l'ensemble du processus allant de l'identification des besoins pédagogiques à la conception, la réalisation et l'évaluation d'un simulateur innovant. Il s'agit d'une contribution concrète et locale à l'amélioration de l'enseignement médical, offrant une solution moderne et sécurisée pour la formation à l'examen clinique des douleurs abdominales. En répondant à un besoin réel et pressant, ce projet ouvre la voie à de nouvelles méthodes d'apprentissage, plus interactives et plus proches des exigences de la médecine contemporaine, tout en plaçant la sécurité des patients et le progrès pédagogique au cœur de la démarche.



Chapitre I : De l'anatomie a la simulation
clinique d'abdomen

I. Chapitre 1 : De l'anatomie à la simulation clinique d'abdomen

I.1 Introduction :

Ce chapitre se propose d'explorer l'abdomen sous différents angles, combinant connaissances anatomiques, pratiques cliniques et perspectives pédagogiques. Il commence par une description de l'anatomie abdominale, indispensable pour établir une base solide : comprendre la localisation des organes, leurs relations et leurs fonctions est fondamental pour toute approche clinique ou pédagogique. Cette première section fournit ainsi les repères nécessaires pour interpréter correctement les signes et symptômes observés ultérieurement.

La deuxième partie se concentre sur l'examen clinique, qui constitue le lien direct entre la théorie et la pratique. Elle présente les méthodes utilisées par les professionnels de santé pour évaluer l'état de l'abdomen et détecter des anomalies. Cette section met en lumière l'importance de techniques telles que l'inspection, l'auscultation, la percussion et la palpation, et prépare le terrain pour comprendre comment la douleur et les réactions abdominales peuvent être évaluées. La typologie des douleurs abdominales est abordée comme une section indépendante. Elle joue un rôle central dans l'étude en offrant un cadre pour classer les différents types de douleur, comprendre leurs origines et leur signification clinique. Cette typologie est essentielle, car elle oriente les décisions diagnostiques et constitue un élément clé pour concevoir des scénarios réalistes dans un contexte de simulation médicale.

La simulation médicale constitue une étape cruciale du chapitre, traduisant la théorie et les observations cliniques en une expérience pratique et pédagogique. Elle permet de reproduire les réactions abdominales dans un environnement sécurisé, facilitant l'apprentissage pour les étudiants et le développement de compétences pratiques. Cette section illustre comment les connaissances anatomiques et cliniques peuvent être intégrées dans des modèles interactifs, renforçant la compréhension et l'application des concepts.

Enfin, l'état de l'art présente une synthèse des travaux et dispositifs existants. Cette comparaison permet d'identifier les points forts et les limites des simulateurs déjà développés, de situer l'étude dans son contexte scientifique et de justifier l'intérêt d'approches nouvelles ou améliorées.

Dans son ensemble, ce chapitre guide le lecteur de la connaissance théorique à l'application pratique, en reliant anatomie, évaluation clinique, typologie des douleurs et simulation. Il met en lumière l'importance d'une approche intégrée pour comprendre l'abdomen et pour développer des

outils pédagogiques efficaces, tout en soulignant la pertinence scientifique et l'innovation de l'étude menée.

I.2 Anatomie de l'abdomen :

I.2.1 Définition de l'abdomen :

L'abdomen est la région du corps située entre le thorax et le bassin. Sa limite supérieure fait face au thorax et est fermée par le diaphragme. En bas, l'abdomen est ouvert vers le pelvis, avec lequel il communique à travers l'orifice pelvien supérieur (ou détroit supérieur). Ces deux ouvertures, combinées aux parois abdominales, délimitent la cavité abdominale.

On distingue deux parois musculofasciales : la paroi antérolatérale et la paroi postérieure. Elles s'attachent aux structures osseuses environnantes : la colonne vertébrale, le bord inférieur de la cage thoracique, et les bords supérieurs du bassin osseux. La nature majoritairement souple de ces parois abdominales leur confère une grande flexibilité, ce qui leur permet de s'adapter aux mouvements et aux variations de volume des organes abdominaux.

Pour faciliter l'orientation clinique, l'abdomen est classiquement divisé en **quatre quadrants** : supérieur droit, supérieur gauche, inférieur droit et inférieur gauche ; ainsi qu'en **neuf régions anatomiques** : hypocondres droit et gauche, régions lombaires droite et gauche, régions inguinales droite et gauche, épigastre, région ombilicale et hypogastre.

Les organes abdominaux appartiennent à plusieurs systèmes :

- **Système digestif** : estomac, intestin grêle, côlon (gros intestin), pancréas exocrine, foie et vésicule biliaire
- **Système urinaire** : reins et uretères
- **Système immunitaire** : rate
- **Système endocrinien** : glandes surrénales, pancréas endocrine. [1]

I.2.2 Les régions de l'abdomen :

La paroi abdominale se divise en zones distinctes selon des repères visibles ou palpables, tels que les arcs costaux ou la ligne blanche. En pratique clinique, on distingue trois parties principales : l'abdomen supérieur (Epigastre), l'abdomen moyen(mésogastre) et l'abdomen inférieur(hypogastre). Les frontières entre ces parties sont marquées par deux lignes horizontales : la première, appelée ligne horizontale (a), relie les points bas des arcs costaux droit et gauche, tandis que la seconde, ligne horizontale (b), sépare les crêtes iliaques droite et gauche. Pour affiner

cette division, deux lignes verticales sont utilisées : la ligne C' qui passe par le centre des clavicules et la ligne C'' qui traverse le milieu des ligaments inguinaux.

L'abdomen supérieur se divise en trois régions l'hypochondre droit et gauche (situés sous les côtes) et au centre la région épigastrique (haut du ventre) le moyen se compose de trois régions latérale droite et gauche et la région ombilicale au centre (autour du nombril). Enfin, la partie inférieure inclut, sur les côtés, les régions inguinales droite et gauche (au niveau des aines), et au centre, la région pubienne (bas-ventre médian). [2]

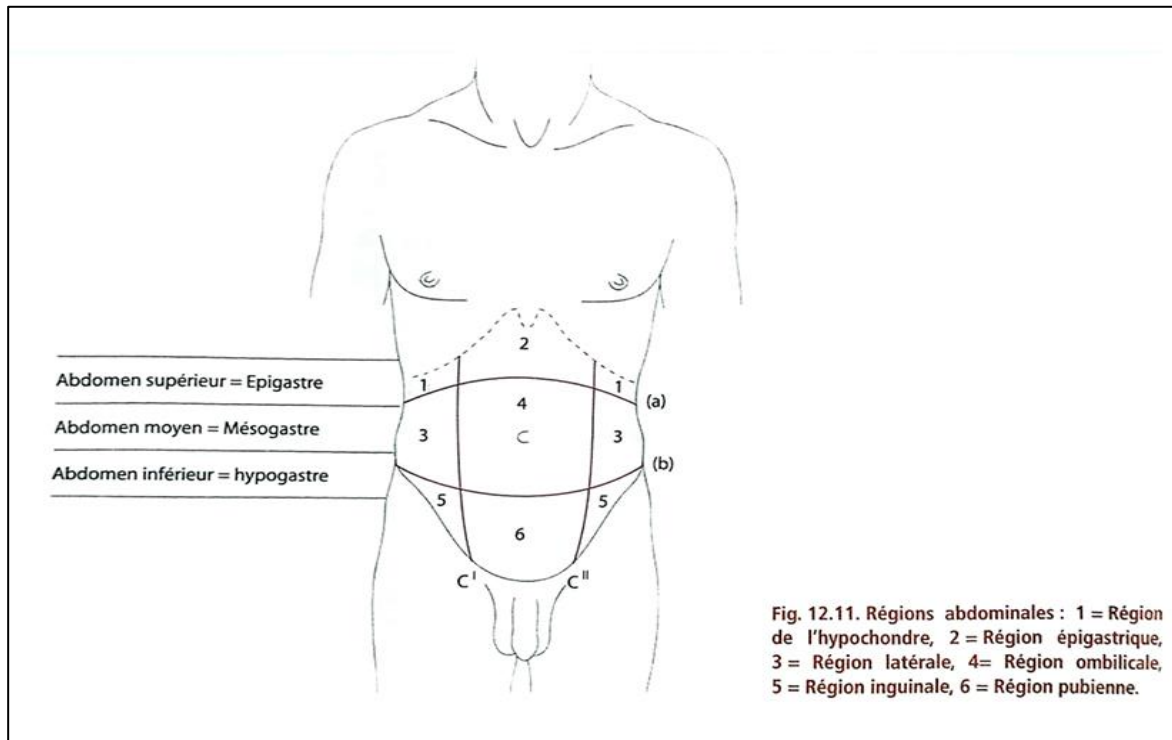


Figure 1: les régions de l'abdomen [2]

I.2.3 Projection des organes sur la paroi abdominale :

En haut, juste au-dessus de l'estomac, on trouve la région épigastrique. Elle renferme surtout l'estomac, le foie et le pancréas.

De chaque côté de cette zone se situent les hypochondres. À droite, on retrouve le foie, la vésicule biliaire et une partie du côlon. À gauche, ce sont plutôt la rate, un morceau de l'estomac et une portion du côlon.

Plus bas, de chaque côté, se trouvent les flancs droit et gauche. Ces zones abritent les reins, une partie de l'intestin grêle et du côlon.

Au centre, autour du nombril, il y a la région ombilicale. Elle contient surtout l'intestin grêle et un morceau du côlon.

En descendant encore, on arrive à la zone pelvienne. C'est là qu'on trouve la vessie, les organes reproducteurs et une partie du côlon.

Juste au-dessus de l'os pubien, la région pubienne abrite une portion de l'intestin grêle et du côlon. Enfin, tout en bas, dans l'hypogastre, on retrouve de nouveau la vessie, les organes liés à la reproduction et une partie du côlon. [3]

I.3 Examen clinique abdominal :

L'examen clinique abdominal est une étape essentielle de l'évaluation physique du patient. Il consiste à examiner les organes de l'abdomen à l'aide de quatre techniques physiques : **l'inspection, l'auscultation, la percussion, et la palpation.**

I.3.1 L'inspection

L'abdomen est inspecté lorsque le patient est allongé sur le dos, sur une table ou un lit d'examen. Il faut placer de petits oreillers ou des draps pliés sous la tête et les genoux, pour assurer le confort et détendre les muscles de la paroi abdominale. Toute la paroi doit être visible, il faut donc bien ajuster les draps. Les bras du patient doivent rester le long du corps, car les placer derrière la tête tend les muscles abdominaux. Un bon éclairage est essentiel. Un éclairage rasant est aussi utile, car il fait apparaître des ombres subtiles, notamment en cas de masses dans la paroi abdominale.

On commence par observer la forme générale de l'abdomen. Il faut vérifier s'il y a une distension (gonflement), et si celle-ci est généralisée ou localisée à une partie précise. Les flancs doivent aussi être examinés pour repérer un éventuel bombement.

La peau abdominale doit être inspectée attentivement. On note toute décoloration, comme une teinte bleue autour du nombril (signe de Cullen) ou sur les flancs (signe de Grey Turner). Il faut aussi rechercher des vergetures (stries) ou des cicatrices chirurgicales, et les comparer avec les antécédents opératoires du patient. La peau doit être examinée pour détecter des veines dilatées, et il faut vérifier la direction du sang dans ces veines. Pour cela, on place deux doigts sur une veine visible, on les écarte tout en maintenant la pression, ce qui vide le segment veineux entre les doigts. Ensuite, on relâche un doigt et on observe la direction de remplissage de la veine. Puis on recommence en relâchant l'autre doigt pour comparer.

Au-dessus du nombril, le sang circule normalement vers le haut ; en dessous, vers le bas. Une obstruction de la veine cave inférieure peut inverser ce flux. Il faut également noter la présence éventuelle d'angiomes stellaires sur la peau abdominale.

Ensuite, il faut rechercher des masses visibles. Cette observation doit être faite sous plusieurs angles. Il est important de distinguer les masses situées dans la paroi abdominale de celles situées à l'intérieur de l'abdomen. Une masse pariétale devient plus visible quand les muscles abdominaux sont contractés, alors qu'une masse intra-abdominale devient moins visible, voire invisible. Des manœuvres utiles consistent à demander au patient de :

- lever la tête sans soutien,
- se pincer le nez et souffler,
- ou soulever les jambes.

Les masses pariétales les plus fréquentes sont les hernies (ombilicale, épigastrique, incisionnelle ou de Spiegel), les tumeurs (bénignes ou malignes), les infections et les hématomes.

Si la masse est intra-abdominale, il faut indiquer dans quel quadrant elle se trouve. Il faut ensuite analyser ses caractéristiques : bouge-t-elle avec la respiration ? Est-elle pulsatile (bat-elle avec le cœur) ? Observe-t-on un mouvement de péristaltisme (comme un intestin dilaté) ?

Enfin, on observe les mouvements de la paroi abdominale pendant la respiration. Normalement, la paroi se déplace vers l'arrière de manière symétrique à l'inspiration. En cas de péritonite, la paroi peut devenir rigide, ce qui bloque ou réduit ce mouvement.



Figure 2 [4] : L'inspection

I.3.2 Auscultation

Le patient est installé confortablement en position allongée sur le dos, comme décrit lors de l'inspection. À l'aide du stéthoscope, on écoute différentes zones de l'abdomen pendant plusieurs minutes pour détecter les bruits intestinaux. Le diaphragme du stéthoscope doit être appliqué sur la paroi abdominale avec une pression ferme mais douce. Il est souvent utile de le réchauffer entre les mains de l'examineur avant de l'utiliser, surtout chez les patients chatouilleux. Si aucun bruit intestinal n'est entendu, il faut écouter pendant **3 minutes complètes** avant de conclure qu'ils sont absents.

L'auscultation à la recherche de **bruits vasculaires abdominaux** constitue la prochaine étape. Les **bruits** (ou *bruits de souffle*) sont des sons de type « sifflement » entendus au niveau des grandes artères pendant la systole, ou parfois pendant la systole et la diastole. Il faut ausculter avec soin les zones situées au niveau de l'aorte, des deux artères rénales et des artères iliaques pour détecter d'éventuels souffles.

Les **frottements** sont rarement entendus à l'examen abdominal, mais ils peuvent apparaître au niveau du foie, de la rate ou d'une masse abdominale.



Figure 3 [4] : Auscultation

I.3.3 Percussion abdominale

La **percussion** est utilisée pour évaluer la présence d'**ascite**. Un abdomen arrondi, symétrique, avec des flancs bombés, peut être un premier signe. La palpation dans ces cas donne souvent une sensation **pâteuse**, presque **fluctuante**. Dans les cas avancés, la paroi devient tendue à cause de la distension provoquée par le liquide.

Les intestins remplis de gaz flottent au-dessus du liquide. Ainsi, chez un patient allongé avec ascite, on retrouve généralement un **tympanisme** autour du nombril et une **matité** dans les flancs. Il faut marquer le niveau de matité sur la peau, puis tourner le patient sur le côté pendant une minute. Si le niveau de matité change, on parle de **matité mobile (shifting dullness)**, ce qui indique en général la présence de plus de 500 ml de liquide.

Un autre signe physique est la **vague liquidienne**. Le patient (ou un assistant) place une main fermement contre la paroi abdominale au niveau du nombril. L'examineur place une main à plat sur le flanc droit, puis tape légèrement sur le flanc gauche. En présence d'ascite, une onde de pression est transmise jusqu'à la main droite. Cependant, le tissu adipeux peut également transmettre une onde, ce qui donne parfois de **faux positifs**.

En plus de l'ascite, la percussion permet de mieux caractériser une **masse abdominale**. Un **tympanisme** sur une masse suggère qu'elle est remplie de gaz, comme dans le cas d'un intestin dilaté. La percussion est aussi utilisée pour déterminer la **taille du foie**.



Figure 4 [4] : Percussion abdominale

I.3.4 Palpation abdominale : méthode et rôle dans le diagnostic des douleurs

La palpation est un examen de l'abdomen pour rechercher des craquements sous la peau, des douleurs ou des grosseurs. Le foie et les reins peuvent être palpés chez des personnes en bonne santé, mais toute autre masse est considérée comme anormale.

➤ **Méthode :**

Le patient est allongé sur le dos, avec la tête et les genoux soutenus, comme pour l'inspection et l'auscultation. Il faut d'abord poser les questions au patient et faire l'inspection et l'auscultation avant de commencer la palpation. Cela permet de rassurer le patient et d'avoir plus de coopération. De plus, la palpation peut stimuler l'activité intestinale et fausser les bruits intestinaux si elle est faite avant l'auscultation.

Demandez aux patients qui ont mal au ventre d'indiquer l'endroit où la douleur est la plus forte. Ensuite, rassurez-les en disant que vous allez essayer de réduire leur douleur pendant l'examen et que vous examinerez cette zone en dernier.

Pour palper l'abdomen, on commence doucement en touchant la paroi abdominale avec le bout des doigts. Cela permet de sentir un craquement appelé crépitation, qui peut être un signe de gaz ou de liquide sous la peau. Cela permet aussi de détecter des irrégularités dans la paroi abdominale, comme des lipomes (boules de graisse) ou des hernies, et de repérer les zones sensibles.

La palpation profonde de l'abdomen se fait en posant la main à plat sur le ventre et en appuyant fermement et régulièrement. Il peut être utile d'utiliser les deux mains, surtout pour évaluer une masse. Dans ce cas, la main du dessus exerce la pression, tandis que la main du dessous sent ce qui se passe.

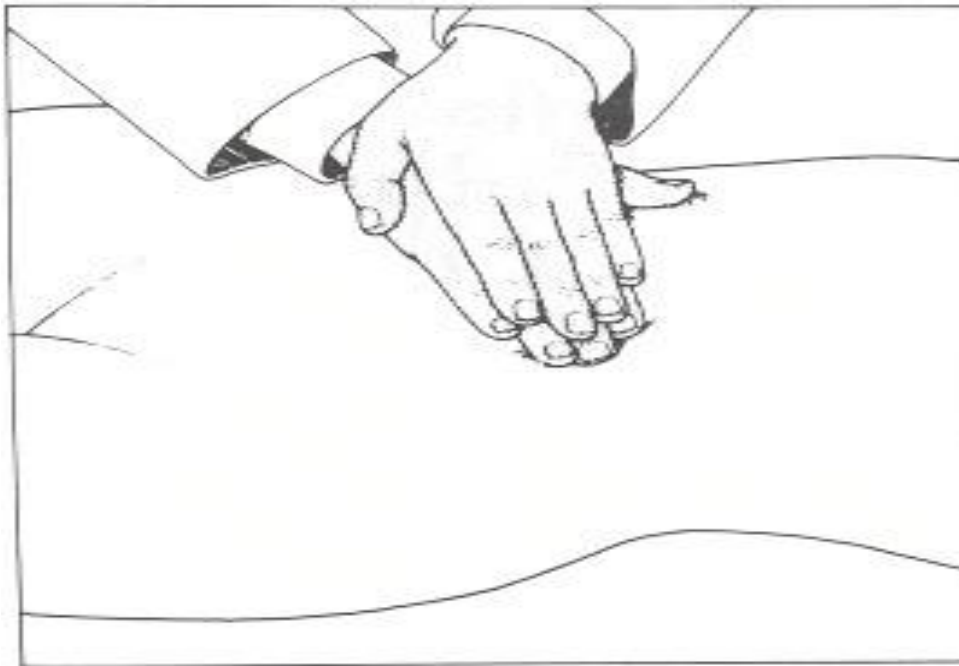


Figure 5 [5] : palpation profonde

Il faut commencer la palpation profonde dans la zone opposée à celle où le patient a mal, et examiner chaque quadrant un par un. Sous les côtes, il est utile de demander au patient de respirer profondément pour mieux sentir le foie, la vésicule biliaire et la rate.

Dans les flancs, il peut être utile de soulever un peu la zone à examiner et de poser une main sur les côtes du même côté pour pousser les organes vers la main qui examine. Cela permet de détecter des petites masses rénales qu'on pourrait autrement ne pas sentir.

La sensibilité abdominale est une réponse de douleur que l'on provoque en palpant. Il faut décrire où elle se trouve (dans quel quadrant), si elle est déclenchée par une palpation légère ou profonde, et la réaction du patient (douleur légère ou forte).

Le spasme ou la rigidité est une contraction involontaire des muscles abdominaux causée par une inflammation interne. La défense, au contraire, est une contraction volontaire des muscles abdominaux pour éviter la douleur.

Donc, la défense est souvent présente dans tout l'abdomen, alors que la rigidité ne concerne que la zone enflammée. On peut souvent faire disparaître la défense en demandant au patient de relâcher les muscles, mais pas la rigidité. La rigidité est donc un signe clair d'inflammation du péritoine. La douleur provoquée par le relâchement est une douleur ressentie quand on retire rapidement la main qui palpe. C'est un signe difficile à apprendre pour les débutants. L'erreur fréquente est d'enlever la main trop vite, ce qui effraie le patient.

Il suffit de lever la main de façon souple mais rapide, et d'observer s'il y a de la douleur, une grimace du visage ou un spasme des muscles du ventre.

La douleur et la douleur provoquée par le relâchement peuvent apparaître dans une autre zone que celle qu'on touche. Par exemple, si on appuie dans le bas-ventre gauche et que la douleur apparaît dans le bas-ventre droit (comme dans l'appendicite), on parle de douleur référée. C'est aussi vrai pour la douleur au relâchement.

Quand on sent une masse dans l'abdomen, la première question est de savoir si elle est à l'intérieur de l'abdomen ou dans la paroi. Pour le savoir, on demande au patient de lever la tête ou les pieds. Cela contracte les muscles du ventre. Une masse intra-abdominale devient alors plus difficile à sentir, tandis qu'une masse dans la paroi devient plus visible.

Si la masse est à l'intérieur, il faut noter sa taille, sa position, si elle est sensible au toucher, et si elle bouge.

I.4 Les signes physiologiques observés lors de la palpation abdominale

I.4.1 La douleur abdominale

C'est la **réaction douloureuse ressentie par le patient** quand on appuie sur une zone de l'abdomen. Elle est provoquée par une irritation ou une inflammation des tissus internes, notamment du **péritoine pariétal**, qui est riche en nerfs sensitifs.

Lorsqu'elle est présente, la douleur doit être décrite selon :

- **La localisation** (dans quelle région abdominale elle apparaît),
- **La profondeur** de la pression nécessaire pour la déclencher (superficielle ou profonde),
- **L'intensité** de la réaction du patient (douleur légère ou sévère).

I.4.1.1 Typologie des douleurs abdominales

La douleur abdominale désigne toute sensation douloureuse ressentie entre les zones du thorax et du bassin peuvent être classées selon leur nature. Il existe trois grands types : **les douleurs somatiques** qui viennent de la paroi abdominale ou de réflexes cutanés, **les douleurs viscérales** qui sont liées aux organes internes ou aux structures situées à l'intérieur de l'abdomen et **les douleurs projetée**. Faire la différence entre ces trois types de douleurs est très important pour poser un bon diagnostic.

La douleur viscérale vient des organes dans la cavité abdominale (les viscères). Les nerfs des viscères ne réagissent pas aux blessures comme les coupures ou inflammations, mais plutôt à l'étirement des organes (par exemple, lorsque l'intestin se dilate avec des gaz) ou à la contraction des muscles autour. En général, la douleur viscérale est diffuse, sourde et peut être accompagnée de nausées. Elle est souvent difficile à localiser. Les douleurs dans le haut de l'abdomen peuvent être causées par des problèmes avec l'estomac, le duodénum, le foie ou le pancréas. Les douleurs au centre de l'abdomen, près du nombril, peuvent venir de l'intestin grêle, de la partie supérieure du côlon ou de l'appendice. Les douleurs dans le bas de l'abdomen sont souvent dues à des problèmes dans la partie inférieure du côlon ou certains organes urinaires ou génitaux.

La douleur somatique, elle, vient du péritoine, la membrane qui recouvre la cavité abdominale. Contrairement aux nerfs des viscères, les nerfs du péritoine réagissent aux coupures et irritations (comme une hémorragie, une infection, des produits chimiques ou une inflammation). Cette douleur est plus vive et facile à localiser. [6]

Pendant le développement du corps, les nerfs se forment de façon organisée. Certains nerfs sont reliés à la fois à une zone précise de la peau et à un organe situé à la même hauteur dans le corps.

Par exemple, la peau autour du nombril est connectée aux mêmes nerfs que certains organes de l'abdomen. Quand un organe devient malade ou douloureux, ces nerfs peuvent envoyer un signal qui fait croire au cerveau que la douleur vient de la peau, alors qu'elle vient de l'intérieur : c'est ce qu'on appelle un réflexe viscéro-cutané. À l'inverse, si on stimule la peau, comme en posant une source de chaleur sur le ventre, cela peut calmer la douleur de l'organe. Ce phénomène s'appelle un réflexe cutané-viscéral. [2]

La douleur projetée est une douleur ressentie dans une autre partie du corps que celle où le problème se trouve vraiment. Cela arrive parce que certains nerfs se rejoignent dans la moelle épinière. Par exemple, un problème à la vésicule peut faire mal à l'épaule ou au dos, un problème au rein peut faire mal à l'aîne, et une irritation du diaphragme peut donner mal à l'épaule. [6]

Zones de Head :

Les zones de Head désignent des **régions cutanées** (dermatomes) associées au phénomène de « **douleur projetée** ». Ces zones entretiennent une **relation nerveuse** avec des organes internes spécifiques. Lorsqu'un organe est atteint par une pathologie, cela provoque des douleurs ou une hypersensibilité dans le **territoire cutané** qui lui est relié. [2]

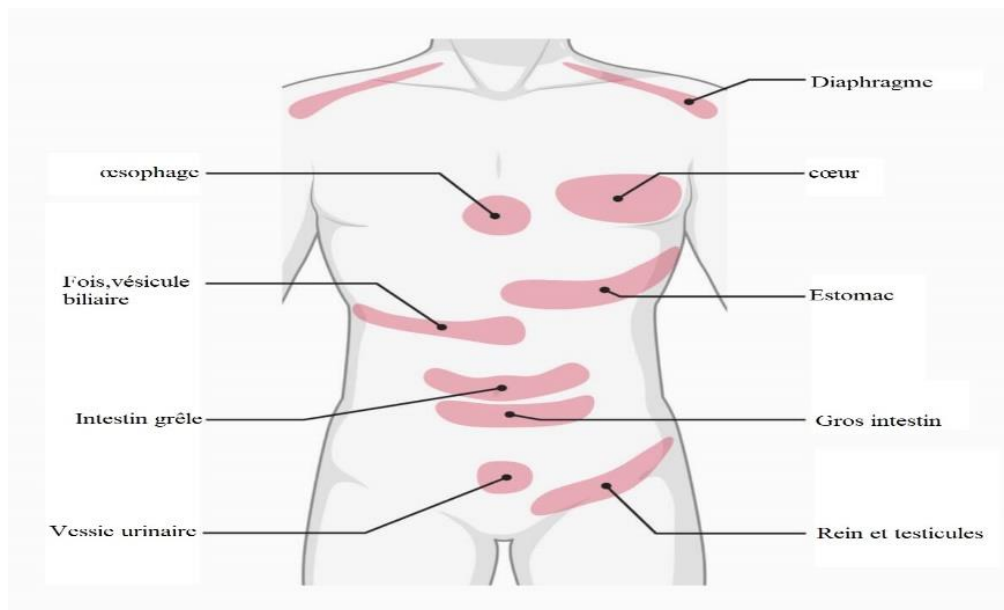


Figure 6 [2] : Les zones de Head

En plus de classer les douleurs abdominales selon leur nature, on peut aussi les classer selon les régions de l'abdomen. L'abdomen est divisé en plusieurs zones, comme l'épigastre, les hypochondres, la région ombilicale ou encore les fosses iliaques. Cette classification est

importante, car elle aide à mieux localiser la douleur et à identifier les organes qui peuvent être touchés et proposé des diagnostics.

Les diagnostics on fonction du douleurs abdominales est présentée dans la figure suivante :

<p>HYPOCHONDRE D Lithiase biliaire Cholécystite/ angiocholite Ulcère GD Pancréatite Hépatite, cirrhose du foie Colique néphrétique Pyélonéphrite aiguë Pleuro-pneumopathie base D</p>	<p>EPIGASTRE Pancréatite Ulcère GD (perforé?) RGO/ dyspepsie/ gastrite Lithiase biliaire Cholécystite/ angiocholite Torsion épiploïque</p>	<p>HYPOCHONDRE G Pancréatite Colique néphrétique Ulcère GD Lésions spléniques Pyélonéphrite aiguë Pleuro-pneumopathie base G</p>
<p>FLANC D Colique néphrétique Infection urinaire / PNA Pathologie rachidienne Infarctus rénal Appendicite rétrocaecale Dissection aortique/ Fissuration AAA Pathologie gynéco</p>	<p>PERI-OMBILICAL Occlusion Péritonite Dissection aortique/ Fissuration AAA Adénite mésentérique</p>	<p>FLANC G Colique néphrétique Infection urinaire / PNA Pathologie rachidienne Infarctus rénal Appendicite rétrocaecale Dissection aortique/ Fissuration AAA Pathologie gynéco</p>
<p>FID Appendicite Pathologie annexielle Colique néphrétique Iléite, diverticulite Crohn/ RCUH Adénite mésentérique Torsion épiploïque Pyélonéphrite aiguë Colon irritable</p>	<p>HYPOGASTRE/ PELVIS Patho annexielle Globe vésical Sigmoidite Dysménorrhées Torsion/ rupture de kyste de l'ovaire Infection tubo-annexielle Colite Colique néphrétique</p>	<p>FIG Sigmoidite Pathologie annexielle Colique néphrétique Colite Tumeur Torsion d'appendice épiploïque Pyélonéphrite aiguë Colon irritable</p>

Figure 7 [7] : les diagnostics on fonction du douleurs abdominales

I.4.1.2 Projection des douleurs d'organes sur la paroi abdominale :

Les organes abdominaux isolés provoquent des douleurs à des endroits précis de la paroi abdominale. Ainsi, en appuyant sur une zone douloureuse, on peut tirer des conclusions sur l'organe concerné.

Estomac : douleur dans la région épigastrique et, en partie, dans la région de l'hypochondre gauche ; douleur typique à la pression dans l'angle épigastrique (sous l'appendice xiphoïde).

Foie / vésicule biliaire : douleur dans la région de l'hypochondre droit, la région épigastrique, et parfois dans l'hypochondre gauche si le lobe gauche est touché. La vésicule biliaire se situe avec son fond sur la ligne médio-claviculaire droite, à la hauteur de la 9^e côte.

Intestin grêle : douleur au milieu du ventre (mésogastre) et dans le bas-ventre (hypogastre), selon la zone concernée. Les douleurs de l'intestin grêle sont souvent diffuses dans tout le ventre.

Gros intestin : le caecum et l'appendice provoquent des douleurs en bas à droite de l'abdomen. Pour diagnostiquer une appendicite, on utilise le point de McBurney (au milieu de la ligne entre l'épine iliaque antérieure et supérieure et l'ombilic) et le point de Lanz (entre le premier et le deuxième tiers de la ligne reliant les deux épines iliaques antérieures et supérieures). [2]

En plus de cette classification selon la nature et la région, les douleurs abdominales peuvent aussi être distinguées selon leur étendue dans l'abdomen. On parle alors de douleurs localisées ou de douleurs généralisées.

Les douleurs localisées se ressentent dans une zone bien précise du ventre. C'est le cas, par exemple, des douleurs provoquées par une appendicite, qui se manifestent souvent dans le quadrant inférieur droit de l'abdomen. À l'inverse, les douleurs généralisées s'étendent sur une grande partie de l'abdomen. Elles peuvent être le signe d'une infection, d'une inflammation ou d'une maladie qui touche plusieurs organes à la fois. [8]

Alors, d'après ce qui précède pour déterminer la douleur abdominale il faut connaître sa nature (somatique ou viscérale), sa région abdominale et l'étendue (localisée ou généralisée), grâce à la palpation abdominale nous pouvons connaître ces éléments et d'orienter le diagnostic.

I.4.1.3 Rôle de la palpation abdominale dans l'évaluation de la douleur :

La palpation abdominale est un moment important de l'examen médical. Elle permet de déterminer la nature de la douleur, sa localisation et son étendue. Une douleur somatique est souvent bien localisée, ressentie dès la palpation légère et parfois accompagnée d'une contraction des muscles de la paroi. Une douleur viscérale, au contraire, est plus diffuse, mal localisée et ressentie surtout lors de la palpation profonde. La palpation aide aussi à situer la douleur dans une région précise de l'abdomen, comme le quadrant supérieur droit ou la fosse iliaque gauche, et à voir si elle est limitée à une zone ou généralisée à tout l'abdomen, comme dans certaines péritonites. Parfois, la douleur peut changer de nature, comme dans l'appendicite qui commence par une gêne diffuse autour du nombril (viscérale) et devient ensuite précise en bas à droite (somatique) lorsque l'inflammation atteint le péritoine. Certaines douleurs peuvent aussi être mixtes dès le départ. Grâce à la palpation, on peut donc déjà formuler des hypothèses sur l'origine et la nature de la douleur abdominale. Le médecin complète ensuite le diagnostic avec d'autres examens comme les analyses sanguines, l'endoscopie digestive, l'échographie et d'autres tests si nécessaire.

I.4.2 La défense abdominale

C'est une **contraction volontaire** des muscles abdominaux. Elle survient **quand le patient anticipe une douleur** au moment de la palpation. C'est une **réaction de protection** consciente.

Caractéristiques :

- Elle est souvent **généralisée** à tout l'abdomen et peut être localisé.

- Elle peut être **diminuée** si le patient parvient à se détendre (par exemple, si on le rassure ou qu'il relâche volontairement ses muscles).

I.4.3 La contracture

C'est une **contraction involontaire, persistante** des muscles abdominaux. Contrairement à la défense, le patient **ne peut pas la contrôler**. Elle survient lorsque les muscles se crispent **spontanément** en réponse à une **inflammation sévère** du péritoine, comme dans une **péritonite**.

Caractéristiques :

- Elle est généralisée à l'abdomen comme la péritonite.
- Elle **ne disparaît pas** même si le patient essaie de se détendre.
- C'est un **signe clinique fort** et préoccupant. [5]

I.5 Simulation médicale

La simulation est devenue en quelques années comme un outil essentiel de la formation des professions à risques. Elle permet de vivre des situations très proches de la réalité, de reproduire les situations les plus diverses, souvent rares dans la réalité, et évidemment d'apprendre les gestes techniques sans prendre le risque de faire une erreur dans une vraie situation.

Aujourd'hui, la simulation est utilisée dans presque tous les domaines de l'industrie, comme le nucléaire, la chimie, l'aviation, les trains, les bateaux, le métro, et aussi en médecine (où le patient et sa maladie représentent le processus à étudier). Il existe plusieurs types de simulation. On peut les classer en quatre grandes catégories qui se complètent et qui sont utiles pour l'apprentissage.

Les simulateurs réalistes pleine échelle, aussi appelés simulateurs-patients (figure 08), sont des dispositifs très fidèles à la réalité, utilisés principalement pour la formation continue. Ils reproduisent à la fois l'apparence du patient et ses fonctions physiologiques, ainsi que l'effet des médicaments. Dans des secteurs à haut risque comme l'aviation ou le nucléaire, ces simulateurs font l'objet d'une certification officielle, car ils permettent d'obtenir une qualification sans avoir été exposé à de vrais vols ou à de véritables installations (on parle de formation « zéro vol » en aéronautique). Cette validation technique est distincte de l'accréditation du centre de formation, qui évalue plutôt les méthodes et les contenus pédagogiques. Ces simulateurs pleine échelle doivent

respecter des normes strictes de performance, d'utilisation et de maintenance, et on peut imaginer que la médecine suivra bientôt des exigences similaires.

Les simulateurs de patients sont généralement classés en trois catégories : les mannequins de basse fidélité, de moyenne fidélité et de haute fidélité.

Les **mannequins de basse fidélité** reproduisent en trois dimensions le corps humain, en totalité ou de façon partielle. Ils sont statiques et destinés principalement à l'apprentissage gestuel. Ils sont utilisés pour la formation en sémiologie (palpation, auscultation cardiaque), dans certains soins (pansements, trachéostomie) ou encore pour la réalisation de gestes invasifs parfois inconfortables (toucher rectal, sondage urinaire, intubation, ponction vasculaire). En l'absence d'interface informatique, la validation repose sur des indicateurs simples, tels que l'écoulement d'un liquide lors d'une ponction ou le gonflement d'un ballon en cas d'intubation réussie. Parmi les exemples figurent les simulateurs de conduits auditifs, les torsos pour la palpation mammaire, les boîtes reproduisant des pathologies palpables (prostate, toucher vaginal), ou encore les bassins pour l'examen gynécologique et obstétrical. D'autres modèles sont spécifiquement conçus pour des gestes techniques : têtes d'intubation, modèles de sutures et d'injections, torsos pour les ponctions lombaires ou péridurales, bassins pour sondages urinaires, bras pour perfusions intraveineuses, ou encore simulateurs de perfusion intraosseuse. Ces mannequins, notamment lorsqu'ils reproduisent un corps entier, sont également utilisés dans les soins infirmiers ou d'urgence pour entraîner le travail en équipe lors de procédures.

Les **mannequins de moyenne fidélité** introduisent une dimension interactive grâce à une interface informatique pilotée par l'enseignant. Ils permettent en général l'auscultation pulmonaire et cardiaque, la perception d'un pouls ainsi que la simulation de troubles du rythme cardiaque. Toutefois, leurs capacités restent limitées : les mouvements respiratoires spontanés, la simulation de la pression artérielle, de la saturation en oxygène ou d'autres paramètres physiologiques ne sont pas pris en compte.

Les **mannequins de haute fidélité** intègrent des systèmes informatiques et robotiques avancés, capables de reproduire un grand nombre de paramètres vitaux et de signes cliniques adaptés au scénario souhaité. Certains modèles sont pilotés directement par l'instructeur (instructor-driven), tandis que d'autres reposent sur des programmes informatisés intégrant des modèles physiologiques et permettant des réponses automatisées ou semi-automatisées (model-driven). Progressivement, la distinction entre ces deux approches tend à disparaître, la plupart des

mannequins actuels combinant les deux modes. Ces simulateurs réagissent aux gestes des participants, y compris aux interventions pharmacologiques, grâce à des capteurs électroniques. Ils peuvent simuler la respiration, la parole, des bruits physiologiques, une mydriase uni- ou bilatérale, la transpiration, les pleurs ou la cyanose. Leur réalisme n'est cependant pas absolu : certains foyers d'auscultation ou indicateurs visuels (LED pour la cyanose, température cutanée fixe) restent éloignés de la réalité clinique. Leur objectif principal est de développer les compétences procédurales et comportementales des apprenants, plus que l'apprentissage de la sémiologie de base. L'évolution récente a vu apparaître des mannequins portables, autonomes et pilotés sans fil, facilitant leur utilisation en dehors des centres spécialisés et permettant des formations en situation réelle (simulation in situ). Enfin, certains modèles de haute fidélité sont parcellaires (torse, crâne) et reliés à une interface 3D, permettant d'associer les gestes techniques à une visualisation virtuelle (pose de voie veineuse centrale, ponctions vasculaires ou nerveuses, échocardiographie, actes intracrâniens). Des capteurs de pression et de position permettent alors de valider le geste en simulant une image adaptée.



Figure 8 [4] : simulateurs-patients

Les simulateurs partiels ou procéduraux se concentrent sur une partie spécifique du processus : ils servent à maîtriser les gestes techniques, comme l'intubation, la pose d'une perfusion ou la coelioscopie, en utilisant par exemple un bras factice ou un organe en plastique.

Les simulateurs virtuels sur ordinateur (ou « micro-mondes réalistes ») (figure 09) offrent une solution d'entraînement peu coûteuse. Elles permettent de proposer une grande variété de scénarios complexes et immersifs, sans nécessiter la présence physique dans un centre spécifique, grâce aux capacités quasi illimitées de mémoire et de calcul des systèmes de cloud computing.



Figure 9 [9] : simulateurs virtuels sur ordinateur

Enfin, les jeux de rôles restent précieux en médecine, surtout pour développer les compétences relationnelles et la communication en situation de crise : annoncer un diagnostic grave, présenter des excuses, ou gérer un triage difficile aux urgences.

La formation avec la simulation en médecine commence à se développer très rapidement et va devenir plus organisée. Dans moins de dix ans, elle devra faire partie des méthodes habituelles de formation et être intégrée dans le système de santé. C'est un projet très grand, mais il est aussi très nécessaire. [10]

1.5.1 L'intérêt de simuler la douleur, défense et contracture abdominales

Simuler la douleur, la défense et la contracture abdominales, c'est une façon plus simple et plus sûre d'apprendre un geste essentiel en médecine : la palpation de l'abdomen. En réalité, cet examen peut être inconfortable ou douloureux pour les patients, même lorsqu'il est réalisé par un médecin expérimenté. C'est pourquoi on évite souvent de le répéter plusieurs fois, surtout avec des étudiants. Sans entraînement régulier, il devient alors difficile de progresser.

Souvent, les étudiants s'exercent entre eux ou sur des patients "standardisés". Mais cette méthode présente des limites : ces personnes n'expriment ni de véritables douleurs, ni de réactions de défense abdominale, ni de contracture musculaire. Il est donc impossible d'apprendre réellement à reconnaître ces signes cliniques essentiels.

Avec un simulateur, c'est différent. On peut répéter les gestes autant de fois que nécessaire, sans faire courir de risque ni provoquer de douleur. Certains simulateurs peuvent même reproduire différents tableaux cliniques et réagir comme un vrai patient. L'étudiant apprend ainsi à reconnaître et interpréter la douleur, à détecter une défense abdominale et à percevoir une contracture musculaire au bon endroit, avec la bonne intensité.

C'est une manière plus concrète, plus sécurisée et plus efficace de se former avant d'examiner de vrais patients. Pour mieux comprendre l'intérêt de la simulation de la douleur, de la défense et de la contracture abdominales dans la formation des futurs médecins, nous vous présentons cette étude :

➤ **Méthodes**

Pendant leur stage en médecine générale, tous les étudiants de troisième année ont eu la chance de s'exercer à la palpation abdominale grâce au simulateur AbSim. Pour ceux qui ont utilisé ce simulateur, leur performance a été évaluée avant et après une séance d'entraînement. Cette session comprenait un retour visuel sur la profondeur et la zone de palpation. Tous les étudiants ont également indiqué leur niveau de confiance au début et à la fin du stage.

➤ **Résultats**

Sur 137 étudiants, 119 (86,9 %) ont rempli le questionnaire initial, et 73 (61,3 %) ont eu recours au simulateur. L'entraînement a permis une nette amélioration de leur performance (évaluée selon quatre critères, avec une forte signification statistique, $p < 0,001$). Avant la formation, leurs résultats n'étaient pas corrélés à la durée de leurs stages précédents, ni au fait d'avoir effectué des stages en médecine interne ou en chirurgie. Par ailleurs, il existait peu de lien entre leur confiance initiale en palpation abdominale et leurs résultats réels. Toutefois, les étudiants ayant opté pour l'entraînement au simulateur étaient souvent ceux qui manquaient le plus de confiance au départ, et leur assurance a augmenté après la formation.

On conclure que l'entraînement avec un simulateur abdominal a permis aux étudiants d'améliorer leur technique de palpation, en appliquant une profondeur et une couverture plus appropriées. Même si leur niveau de confiance ne reflétait pas toujours leurs compétences réelles, ceux qui étaient les moins sûrs d'eux ont été plus enclins à utiliser le simulateur, et ils ont gagné en assurance après l'avoir utilisé. [11]

Dans cette perspective, et afin de contribuer au développement de la simulation médicale en Algérie, nous allons réaliser notre projet intitulé « *Conception d'une maquette de simulation d'examen clinique d'un abdomen douloureux* ». Ce travail a pour objectif de simuler l'examen de palpation abdominale, un geste

important dans le diagnostic médical, en proposant un outil pédagogique simple et adapté aux besoins de la formation médicale locale.

I.6 Défis techniques de la simulation des douleurs abdominales :

Lorsqu'un médecin palpe un abdomen, il ne se contente pas de poser la main : il évalue avec précision la souplesse des tissus, la présence éventuelle de résistances, la tonicité musculaire et les réactions douloureuses du patient. Ces informations sont essentielles, car elles orientent le diagnostic vers des pathologies bénignes ou graves, comme une simple contracture musculaire, une appendicite ou une péritonite. Reproduire fidèlement ces sensations dans une maquette de simulation constitue un défi majeur, car il s'agit de transposer des phénomènes biologiques complexes dans un dispositif artificiel. Deux grandes difficultés se posent particulièrement. La première concerne la texture et la consistance de la "peau" et des couches sous-jacentes, qui doivent offrir un réalisme tactile suffisant pour permettre à l'apprenant de distinguer entre une palpation normale et une palpation pathologique. La seconde difficulté réside dans la simulation de la douleur et des réactions associées : une maquette réaliste doit être capable de signaler au futur médecin, par des indices perceptibles, la présence d'une sensibilité anormale ou d'une défense abdominale. Ces défis sont fondamentaux, car sans eux la simulation perdrait sa valeur pédagogique. Réussir à reproduire ces caractéristiques permet non seulement d'améliorer l'apprentissage pratique, mais aussi de renforcer la confiance des étudiants avant leur confrontation avec de vrais patients, où chaque geste clinique a une portée diagnostique et éthique importante.

I.7 État de l'art :

I.7.1 Introduction :

La formation pratique aux gestes d'examen clinique occupe une place centrale dans l'enseignement médical. L'examen abdominal (inspection, auscultation, palpation, percussion) demande une habileté tactile et une expérience clinique acquise par la répétition. Les simulateurs d'abdomen visent à permettre cet entraînement en environnement sécurisé, en reproduisant des sensations tactiles (texture, souplesse, résistance), des signes pathologiques (sensibilité, défense, contracture) et des scénarios cliniques (masses, ascite, douleur localisée).

Deux brevets récents illustrent des approches significatives dans ce domaine : le brevet international WO2014145013A1, qui propose un simulateur à haut réalisme intégrant des éléments

haptiques et des actionneurs, et le brevet chinois CN112652206A, qui décrit un dispositif interactif orienté vers la flexibilité pédagogique et la détection de pression. L'analyse détaillée de ces documents permet d'identifier les solutions techniques existantes, leurs forces, leurs limites et les voies d'amélioration.

I.7.2 Le brevet WO2014145013A1

But général

Ce simulateur cherche à reproduire la forme de l'abdomen, la consistance des tissus et les réactions comme la défense ou la contracture. Il est destiné aux centres de formation avancée et à la préparation chirurgicale.

Matériaux et structure

- **Base rigide** : supporte tout le simulateur.
- **Couche de mousse ou élastomère** : simule les tissus mous sous la peau.
- **Couche musculaire** : plaques ou polymère pour donner la bonne résistance et la possibilité de changer la dureté.
- **Peau en silicone** : reproduit la texture, l'élasticité et l'apparence de la vraie peau.
- **Organes factices** : foie, rate, intestins, masses, placés à la bonne position et parfois interchangeables.
- **Actionneurs** : petits moteurs ou vérins qui peuvent augmenter la rigidité ou créer une tension pour simuler la contracture.

Électronique et capteurs

- **Capteurs de pression** : placés sous la surface pour mesurer où on touche et avec quelle force.
- **Microcontrôleur** : gère les capteurs et contrôle les actionneurs.
- **Drivers pour actionneurs** : permettent de contrôler les moteurs et leur force.
- **Logiciel sur ordinateur** : permet de créer différents scénarios, de suivre les gestes de l'apprenant et d'afficher les résultats. [12]

Fonctions pédagogiques

- Simulation de la **défense** (contraction partielle des muscles) et de la **contracture** (rigidité localisée et généralisé), modulable selon les besoins.
- Suivi précis des gestes : force appliquée, durée et zones palpées.

Observations

C'est une solution très complète mais complexe. Les difficultés sont :

- La durabilité du silicone,
- La coordination des moteurs sur plusieurs zones,
- Le logiciel qui doit être sophistiqué pour gérer les scénarios.

I.7.3 Le brevet CN112652206A

But général

Ce simulateur est conçu pour apprendre la palpation de manière simple et interactive. Il cherche un bon équilibre entre réalisme et coût, avec un retour facile à comprendre (LED ou son).

Matériaux et structure

- **Peau en silicone** : souple et réaliste.
- **Mousse compressible** : sous la peau pour simuler les tissus.
- **Modules internes** : plaques ou inserts qui peuvent changer la dureté ou créer une bosse pour simuler une masse.
- **Modules interchangeables** : on peut les changer pour différents scénarios.

Électronique

- **Capteurs de pression simples** : détectent où on touche et avec quelle force.
- **Microcontrôleur basique** : déclenche des LED ou un buzzer selon l'appui.
- **Logiciel simple** : l'instructeur peut choisir les zones douloureuses et régler les seuils de pression. [13]

Fonctions pédagogiques

- Flexible et modulable pour différents scénarios.
- Interface facile à utiliser.
- Coût et fabrication accessibles.

Observations

C'est pratique et économique, mais la contracture n'est pas active : elle est statique et préconfigurée. Pas de retour dynamique comme dans WO2014145013A1.

I.7.4 Comparaison des brevets

- **Objectifs pédagogiques** : WO2014145013A1 pour formation avancée ; CN112652206A pour apprentissage de base.

- **Réalité du toucher** : WO2014145013A1 très réaliste et dynamique ; CN112652206A correcte mais statique.
- **Complexité et maintenance** : WO2014145013A1 compliqué et cher ; CN112652206A simple et facile à fabriquer localement.
- **Évolutivité** : WO2014145013A1 permet beaucoup de scénarios mais cher ; CN112652206A facile à dupliquer mais moins riche en scénarios.

Le tableau ci-dessous montre une comparaison des deux brevets selon plusieurs critères importants.

Critère	WO2014145013A1	CN112652206A
Réalisme tactile	Très élevé (moteurs + couches)	Bon (silicone + inserts)
Simulation dynamique	Oui, modulable	Oui, mais statique
Capteurs & mesure	Multipoints, précis	Pression simple
Interface pédagogique	Scénarios avancés, suivi précis	Simple, feedback direct
Fabrication	Très complexe	Moyenne/faible
Coût	Élevé	Faible à moyen
Maintenance	Spécialiste	Simple
Portabilité	Faible	Bonne

Tableau 1 : comparaison entre état d'art

I.7.5 Avantages et limites

WO2014145013A1

- Avantages : très réaliste, mesure précise des gestes, scénarios variés.
- Limites : cher, compliqué, entretien spécialisé, usure rapide du silicone.

CN112652206A

- Avantages : simple, modulable, abordable, facile à utiliser en grand nombre.
- Limites : contracture statique, mesure des gestes limitée, dépendance possible à un logiciel.

I.8 La conception d'un scénario :

La conception d'un scénario clinique est une étape fondamentale dans l'enseignement par simulation. Elle permet de structurer une situation d'apprentissage réaliste et de guider les étudiants

dans le développement de compétences précises. En créant un cadre contrôlé, l'enseignant peut reproduire des situations médicales variées, allant de cas simples à des situations d'urgence, et ainsi préparer l'étudiant à la pratique clinique. L'intérêt majeur réside dans le fait que l'apprenant peut s'entraîner, se tromper et corriger ses erreurs sans mettre en danger un patient réel.

La conception de scénario est faite par plusieurs étapes :

Définir les objectifs pédagogiques :

La première étape consiste à préciser ce que l'on souhaite que l'étudiant apprenne. Les objectifs pédagogiques donnent une direction claire au scénario et évitent de s'éparpiller. Ils doivent être adaptés au niveau des apprenants et formulés de manière observable. Cela signifie que l'on doit pouvoir vérifier si l'objectif a été atteint à la fin de l'exercice.

Exemple : avec la maquette d'abdomen douloureux, les objectifs peuvent être : reconnaître une douleur simple, une défense musculaire et une contracture abdominale, comprendre leur importance clinique ; et développer une première capacité d'interprétation diagnostique.

Préciser le contexte :

Le contexte du scénario permet d'ancrer l'exercice dans une situation qui ressemble à la pratique réelle. Il est important de préciser si le cas se déroule aux urgences, en consultation, dans un service hospitalier ou dans une séance de travaux pratiques. Ce choix influence la manière dont l'étudiant va se comporter et raisonner. Plus le contexte est réaliste, plus l'étudiant sera engagé.

Exemple : Le scénario peut se situer dans un service d'urgences, où un patient consulte pour une douleur abdominale aiguë. Dans ce cas, l'étudiant doit agir rapidement et de façon méthodique afin de reconnaître les signes d'alerte et d'orienter le patient vers une prise en charge adaptée. Le même scénario pourrait aussi être placé dans le cadre d'une consultation médicale, par exemple en service de gastro-entérologie ou en médecine générale. Ici, l'objectif est différent : il s'agit d'apprendre à mener un interrogatoire précis, à examiner l'abdomen de manière complète et à distinguer les symptômes bénins des signes cliniques plus préoccupants.

Élaborer l'histoire du patient :

L'histoire du patient est essentielle car elle donne vie au scénario. Elle doit inclure le profil du patient (âge, sexe, antécédents médicaux), la description des symptômes, leur durée et leur

évolution. Une histoire bien construite aide l'étudiant à entrer dans le rôle de médecin et à réfléchir comme dans la réalité.

Exemple : On peut imaginer un **homme de 35 ans**, sans antécédents notables, qui consulte pour une **douleur abdominale brutale** apparue depuis quelques heures. La douleur s'est progressivement aggravée, au point de rendre la palpation difficile. Face à ce tableau, l'étudiant doit utiliser la maquette pour explorer les différentes zones de l'abdomen et identifier les réactions simulées, telles que la douleur, la défense musculaire ou la contracture persistante. Cette approche lui permet d'apprendre à reconnaître les signes cliniques majeurs sans se limiter à une localisation précise.

Identifier les actions attendues de l'apprenant :

Cette étape consiste à préciser ce que l'étudiant doit réaliser concrètement au cours de la simulation. Il ne s'agit pas seulement de fixer un objectif général, mais de définir des comportements observables qui permettront de vérifier si l'apprentissage a eu lieu. Les actions attendues doivent être claires, mesurables et directement liées aux compétences visées. Par exemple, lors de l'utilisation de la maquette de simulation abdominale, l'étudiant doit savoir interroger brièvement le patient fictif, palper de manière méthodique les différentes zones de l'abdomen, observer les réactions de la maquette (douleur, défense, contracture) et en tirer des conclusions cliniques. L'enseignant peut ainsi évaluer non seulement la technique d'examen, mais aussi la capacité de l'apprenant à interpréter correctement les signes et à proposer une hypothèse diagnostique adaptée. Cette démarche permet de transformer un objectif pédagogique théorique en une séquence pratique, structurée et évaluable.

Choisir le niveau de fidélité

La fidélité d'un scénario désigne son degré de réalisme. Elle peut être faible (cas écrit), moyenne (mannequin simple) ou élevée (maquette interactive ou patient simulé). Le choix dépend du but pédagogique et des moyens disponibles. Plus la fidélité est grande, plus l'engagement de l'étudiant est fort.

Exemple : la maquette interactive d'abdomen douloureux représente un niveau de fidélité moyen à élevé. Elle ne remplace pas un patient réel, mais elle permet de ressentir concrètement la

différence entre douleur, défense et contracture, ce qui constitue un progrès par rapport à une simple description théorique.

Définir les critères d'évaluation :

Il ne suffit pas de faire vivre un scénario, il faut aussi évaluer ce que l'étudiant a appris. Les critères doivent être clairs, objectifs et liés aux objectifs pédagogiques définis au départ. L'évaluation permet à l'enseignant de mesurer les acquis et à l'étudiant de connaître ses points forts et ses points à améliorer.

Exemple : une grille d'évaluation peut vérifier si l'étudiant a : palpé toutes les zones abdominales, reconnu correctement la défense et la contracture, et formulé une interprétation clinique adaptée. L'enseignant peut également observer la méthode employée et la rigueur de l'examen.

Débriefing

Le débriefing constitue un élément fondamental de la formation par simulation, car la qualité de sa mise en œuvre influence directement celle de la session de simulation proposée. Dans le cadre de l'élaboration de programmes de simulation, il est donc essentiel de fournir des recommandations permettant de conduire un débriefing approfondi et pertinent, notamment pour les séances consacrées à la gestion des risques.

Le débriefing peut être défini comme « l'ensemble des séquences visant, après l'action, à amener les apprenants à une analyse réflexive et rétrospective de leur propre activité ». Son rôle principal est d'aider les participants à comprendre, analyser et synthétiser leur raisonnement, leurs émotions et leurs actions survenues durant la simulation, dans le but d'améliorer leurs performances dans des situations futures similaires.

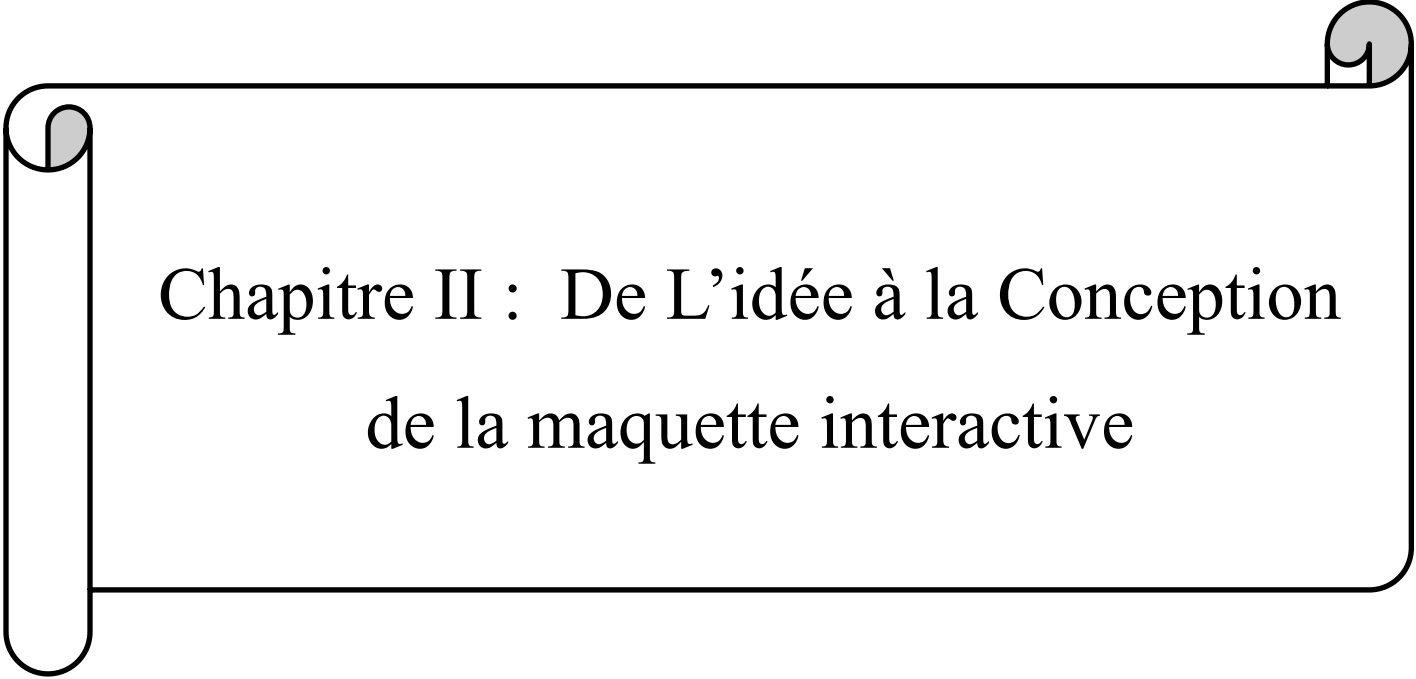
Exemple : après l'exercice, l'enseignant discute avec les étudiants de la différence entre la défense volontaire (réaction musculaire transitoire) et la contracture involontaire (rigidité persistante), et souligne leur importance dans le diagnostic d'une pathologie abdominale. [14]

I.9 Récapitulation

Au fil de ce chapitre, nous avons exploré les bases qui donnent sens à notre projet : comprendre l'abdomen, ses repères anatomiques, la diversité des douleurs et la manière dont elles se manifestent, tout cela sans entrer dans chaque détail technique de notre maquette. L'examen clinique abdominal, à travers l'inspection, l'auscultation, la percussion et la palpation, complète cette compréhension en reliant la théorie à la pratique : il nous permet d'appréhender concrètement la douleur et ses manifestations. Ces connaissances ne sont pas seulement théoriques : elles servent de guide pour la suite, en orientant la conception de notre maquette de simulation.

Chaque notion abordée joue son rôle dans la construction du prototype. Les repères anatomiques nous aident à positionner les zones de simulation avec précision, la typologie des douleurs nous permet de donner vie à des scénarios réalistes, l'examen clinique fournit le cadre pour reproduire fidèlement les gestes et réactions observés chez le patient, et l'étude des solutions existantes nous inspire pour imaginer une maquette à la fois simple, fonctionnelle et fidèle à la réalité clinique. En quelque sorte, ce chapitre agit comme une carte : il montre où nous sommes et comment avancer.

Maintenant, cette étape de réflexion et de préparation cède la place à l'action concrète. Le chapitre suivant sera celui où les idées prennent forme, où la maquette se dessine et devient tangible. Tout ce que nous avons appris ici anatomie, typologie des douleurs et examen clinique va se transformer en gestes, en composants et en interactions, pour créer un outil de simulation utile et réaliste pour les étudiants et les professionnels de santé.



Chapitre II : De L'idée à la Conception
de la maquette interactive

II. Chapitre 02 : De l'idée à la conception de la maquette interactive

II.1 Préambule

Après avoir étudié les bases théoriques et les travaux antérieurs liés à la simulation médicale et à l'évaluation de l'abdomen douloureux, ce chapitre est consacré à la phase de conception de notre maquette interactive. Cette étape représente un moment clé de notre travail, car elle permet de passer de la réflexion abstraite à l'élaboration d'un schéma structuré qui oriente la future réalisation. L'objectif ici n'est pas de présenter un dispositif déjà finalisé, mais de recueillir, analyser et organiser les différentes idées qui tracent le chemin vers la construction du prototype.

La conception constitue en effet une phase essentielle dans tout projet d'innovation biomédicale. Elle sert à transformer des besoins pédagogiques identifiés en orientations concrètes, tout en laissant la place à plusieurs hypothèses et solutions possibles. Dans notre cas, nous avons réfléchi à la manière dont un abdomen douloureux peut être représenté de façon réaliste et pédagogique. Cela nous a conduits à envisager différents aspects : la structure externe qui doit imiter le toucher de la peau, les mécanismes capables de simuler la douleur et la défense abdominale, ou encore les moyens de représenter la contracture musculaire.

Cette démarche s'inspire également de ce que nous avons observé dans les médias, où les étudiants en médecine et les résidents en Algérie expriment régulièrement le besoin d'améliorer la qualité de leur formation pratique. Cette demande a constitué une motivation importante pour la conception de notre projet, en nous incitant à proposer une solution interactive et réaliste qui puisse enrichir l'apprentissage clinique et répondre à ce besoin pédagogique.

En résumé, ce chapitre ne présente pas encore une solution définitive, mais constitue un carrefour où s'expriment différentes pistes de conception. En rassemblant ces idées, en analysant leurs avantages et leurs limites, nous avons pu poser les bases solides de notre futur prototype. Cette phase de réflexion marque ainsi la transition entre l'étude théorique et la mise en œuvre pratique, et prépare la voie aux étapes suivantes de réalisation et d'évaluation.

II.2 La collecte et l'exploration des idées pour la conception de la maquette

Avant de passer à la phase de conception et de réalisation proprement dite, un travail de réflexion préliminaire a été mené afin de collecter et d'explorer différentes idées susceptibles de contribuer à l'élaboration d'une maquette de simulation réaliste et pédagogique. Cette étape, essentielle dans tout projet de conception, a permis de poser les bases de la démarche en identifiant plusieurs pistes possibles, sans pour autant arrêter immédiatement des choix définitifs.

Nous avons d'abord pensé à **la structure générale de la maquette**. Au départ, nous avons pensé à importer une base de l'étranger afin de disposer d'un support déjà conçu et fidèle à la morphologie humaine. Cette option paraissait intéressante, car elle aurait permis de gagner du temps dans la phase de conception et d'assurer un certain niveau de réalisme dès le départ. Cependant, son coût très élevé s'est rapidement révélé être un obstacle majeur, rendant cette solution difficilement envisageable dans notre contexte.

Face à cette contrainte, nous avons orienté notre réflexion vers des alternatives plus accessibles. L'utilisation d'un mannequin local comme base nous a semblé être une piste plus réaliste, puisqu'il offre déjà une forme anatomique proche de l'abdomen humain, tout en restant financièrement abordable.

En ce qui concerne les matériaux internes destinés à reproduire la souplesse et la résistance de l'abdomen, plusieurs hypothèses ont été formulées. Nous avons réfléchi à l'utilisation de mousse ou d'éponge, capables de restituer une sensation de résistance progressive lors de la palpation. Nous avons également pensé à des matériaux gélatineux ou à des poches remplies d'air ou de liquide, qui auraient pu simuler une consistance plus proche de certains tissus organiques. Toutefois, ces options soulevaient des problèmes pratiques, notamment en termes de durabilité, d'entretien et de coût. L'objectif était de trouver un équilibre entre réalisme et faisabilité technique.

Pour la couche externe, qui devait imiter la texture de la peau, nous avons envisagé plusieurs possibilités. Nous avons pensé à utiliser du silicone, reconnu pour sa souplesse et sa ressemblance tactile avec les tissus biologiques. Mais d'autres matériaux ont aussi été évoqués, comme certains types de caoutchouc ou même des textiles élastiques recouvrant une base souple. Pour le choix du matériau constituant la couche externe de la maquette, une visite a été effectuée au centre de simulation médical de la Faculté de médecine de Tlemcen. Cette démarche avait pour objectif d'observer directement les modèles existants et de confirmer les matériaux utilisés dans des

simulateurs pédagogiques déjà opérationnels. Au cours de cette visite, il a été constaté que la plupart des maquettes de simulation médicale intègrent une enveloppe externe en silicone. Ce matériau s'est imposé pour plusieurs raisons : sa texture proche de la peau humaine, sa souplesse qui permet de reproduire les résistances palpables, ainsi que sa durabilité face aux manipulations répétées.

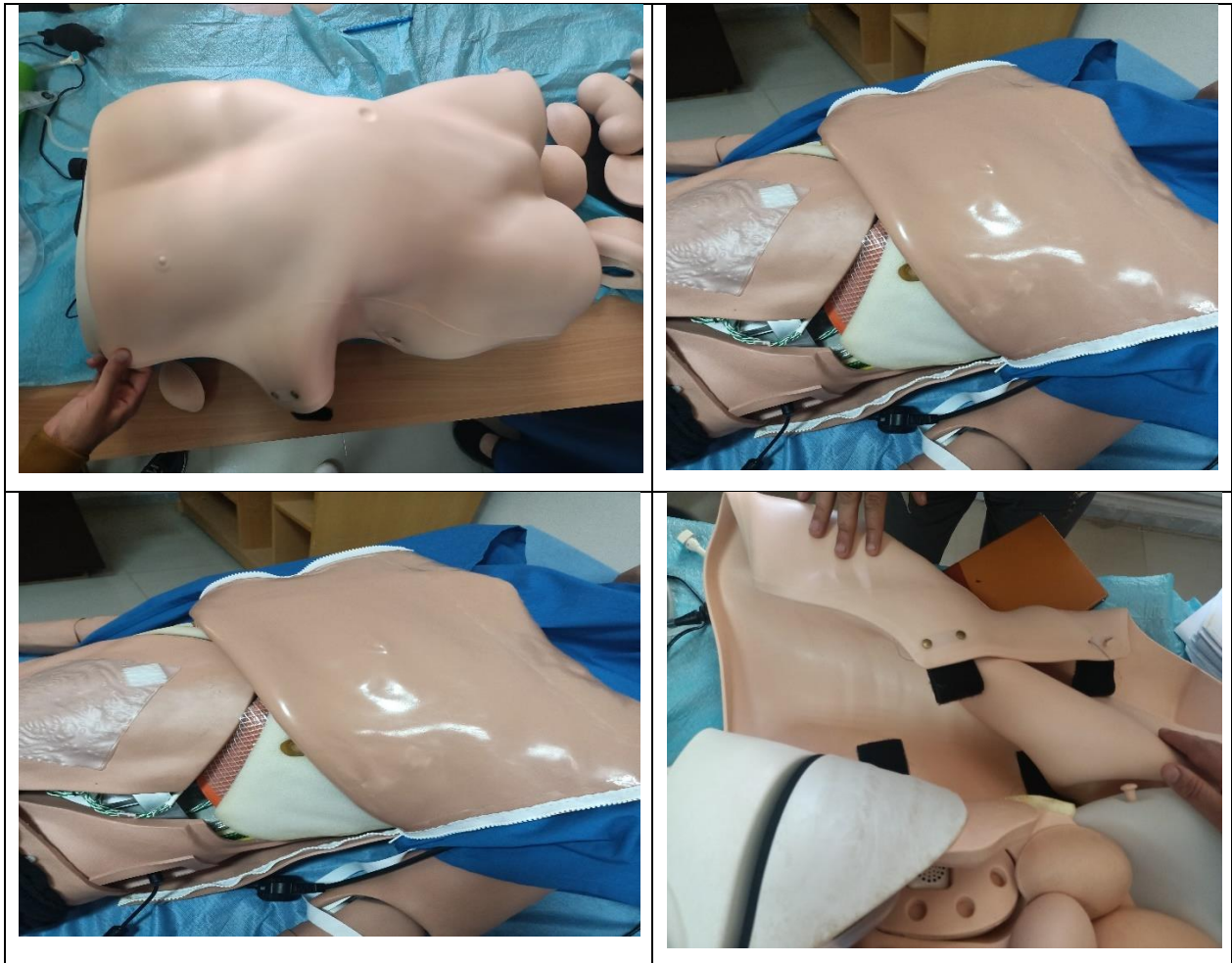


Figure 10 : maquettes de centre de simulation médical de faculté de médecine de Tlemcen

À partir de cette confirmation, une réflexion a été menée quant aux méthodes possibles de fabrication de cette couche. Deux approches principales ont été envisagées : d'une part, l'utilisation de plaques de silicone préfabriquées permettant de recouvrir directement la base de la maquette, et d'autre part, le moulage d'une couche à partir de silicone liquide, plus adaptée pour obtenir une enveloppe continue et personnalisée. Chaque méthode présente des avantages et des contraintes :

les plaques sont plus simples à mettre en œuvre, tandis que le moulage offre une meilleure adaptation morphologique mais exige davantage de ressources techniques.

Ainsi, le choix définitif reste conditionné par des facteurs pratiques, en particulier la disponibilité locale des matériaux et le coût de mise en œuvre. Ce questionnement illustre la démarche progressive adoptée, consistant à confronter les options techniques à la réalité des moyens accessibles, afin d'aboutir à une solution réalisable et adaptée au contexte.

Parallèlement aux considérations matérielles, nous avons également réfléchi au fonctionnement interactif de la maquette. L'objectif était de permettre à l'étudiant d'obtenir un retour direct lorsqu'il exerce une palpation, afin de rendre l'expérience plus réaliste et plus pédagogique. Dans un premier temps, nous avons envisagé l'intégration de capteurs capables de détecter la pression exercée sur l'abdomen. Ces capteurs auraient pour rôle de déclencher différents types de réactions : un signal sonore simulant un gémissement de **douleur**.

En approfondissant cette réflexion, nous avons associé certaines manifestations cliniques à des mécanismes techniques précis. Pour reproduire la **défense abdominale**, nous avons estimé que la vibration constituait le retour le plus proche de la réalité. L'idée d'utiliser de petits moteurs vibrants a ainsi été envisagée pour restituer ce signe clinique. Concernant la **contracture abdominale**, nous avons pensé à introduire une couche qui donnerait un aspect solide à l'abdomen lorsqu'elle est activée. Une piste retenue a été l'intégration de sacs gonflables placés sous la couche externe : une fois gonflés, ces sacs conféreraient une rigidité locale à la surface, traduisant de manière tangible la contracture musculaire. Enfin, les **signaux lumineux** pourraient jouer un rôle complémentaire, en indiquant de manière visuelle la présence ou l'absence d'une douleur lors de la palpation.

Ces différentes pistes montrent que plusieurs options techniques étaient envisageables pour enrichir la maquette en scénarios pédagogiques variés. Toutefois, chacune nécessitait de trouver un compromis entre réalisme clinique, simplicité de mise en œuvre et accessibilité des moyens techniques disponibles.

Dans notre démarche, nous avons aussi pensé à l'intégration d'un microcontrôleur pour assurer la gestion des différents scénarios de simulation. L'idée d'utiliser une carte Arduino nous est venue assez naturellement, car elle permettrait de centraliser les informations recueillies par les capteurs et de déclencher, selon la situation, des réactions adaptées comme un signal lumineux, sonore ou

vibratoire. Nous avons imaginé que cette carte pourrait jouer le rôle de “chef d’orchestre” de la maquette, en coordonnant l’ensemble des éléments pour créer une interaction plus réaliste avec l’étudiant. Cette réflexion nous a permis d’envisager une simulation où chaque geste, chaque palpation ou auscultation, pourrait activer une réponse spécifique et ainsi renforcer la valeur pédagogique du dispositif.

Enfin, nous avons pris en considération des aspects pratiques et contextuels. Les matériaux et dispositifs envisagés devaient être disponibles localement, peu coûteux et faciles à mettre en œuvre, afin de garantir que la maquette puisse être reproduite ou améliorée sans dépendre de ressources extérieures trop onéreuses. Nous avons donc écarté certaines idées trop complexes ou difficilement réalisables dans le contexte de notre projet.

En résumé, cette phase de collecte et d’exploration des idées a constitué un moment clé du projet. Elle a permis de considérer plusieurs solutions, d’en mesurer les avantages et les limites, et de poser les bases d’une réflexion approfondie. Cette étape exploratoire, guidée par le souci du réalisme, de la faisabilité et de l’accessibilité, a ouvert la voie vers les choix définitifs qui seront présentés dans la suite du travail.

II.3 Conception de la maquette interactive

II.3.1 Simulation de l’abdomen humain

Lors de la conception du modèle de simulation, l’objectif principal était de reproduire, de manière simple et réaliste, la sensation d’un abdomen humain afin de permettre aux étudiants d’acquérir une expérience proche de la réalité clinique. L’idée était de trouver un compromis entre le réalisme, la durabilité et le coût, tout en utilisant des matériaux accessibles.

Dans notre prototype pour la base du simulateur, nous avons choisi un mannequin de présentation vestimentaire. Ce choix s’est imposé naturellement pour plusieurs raisons : d’abord, il offre une forme anatomique proche de celle du corps humain, ce qui constitue un point de départ idéal pour la reproduction des structures superficielles. Ensuite, il est stable, léger et facile à manipuler et d’un cout raisonnable.



Figure 11 : mannequin de présentation vestimentaire [15]

Afin de reproduire la souplesse propre à l'abdomen, une surface rigide ne suffisait pas. Nous avons donc décidé d'intégrer une couche intermédiaire capable de conférer une certaine élasticité et de permettre la reconnaissance de la forme lors de la palpation. L'éponge a été retenue pour ce rôle en raison de sa capacité à restituer une sensation souple et compressible, créant ainsi une interaction plus réaliste lorsque l'utilisateur exerce une pression. Son épaisseur peut être ajustée pour modifier légèrement la perception tactile et offrir une expérience variée.



Figure 12 : couche d'éponge [16]

Enfin, pour recouvrir l'ensemble et offrir une sensation tactile proche de celle de la peau humaine, nous avons envisagé la fabrication d'une couche en silicone liquide de type A15. L'idée était de procéder par moulage afin d'obtenir une épaisseur homogène et un rendu réaliste, tant sur le plan visuel que tactile. Une fois cette couche fabriquée, elle aurait pour rôle de recouvrir l'éponge, apportant ainsi une finition esthétique et renforçant le réalisme du simulateur. Le silicone présente plusieurs avantages : il est souple, résistant et capable d'imiter la texture cutanée, ce qui en fait un matériau de choix pour ce type d'application.



Figure 13 : silicone liquide 15 A [16]

II.3.2 Simulation de douleur et défense abdominale

II.3.2.1 Présentation du système global :

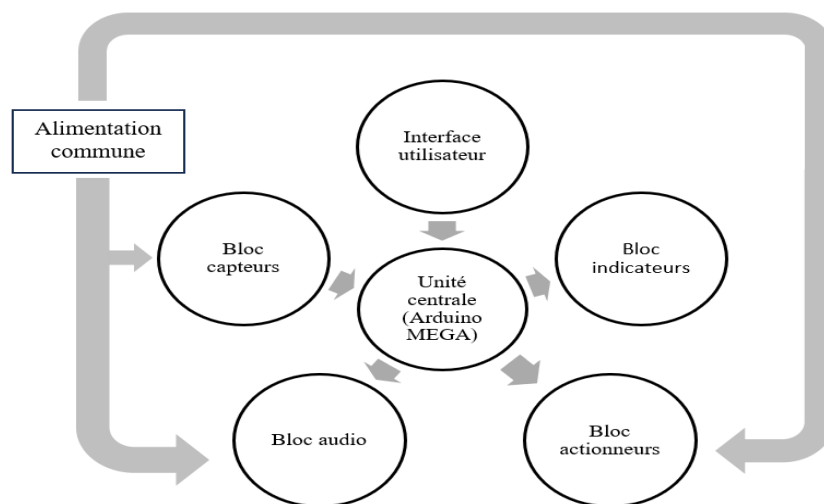


Figure 14 : système global

Le système est conçu pour simuler des réactions abdominales lors d'un examen clinique. Il repose sur une carte Arduino MEGA qui reçoit, via USB, des commandes permettant d'activer certaines zones et de définir un seuil de sensibilité (léger pour une douleur superficielle ou profond pour une douleur plus intense). Neuf capteurs FSR sont intégrés à la maquette, chacun représentant une région anatomique bien définie : l'épigastre, l'hypochondre droit et gauche, les flancs droit et gauche, la région ombilicale, les fosses iliaques droite et gauche ainsi que l'hypogastre. Ces capteurs, connectés aux entrées analogiques A0 à A8, détectent la pression appliquée par la palpation. Lorsque la pression dépasse le seuil configuré, l'Arduino déclenche une réponse multimodale : la LED verte s'éteint et la LED rouge s'allume pour signaler la douleur, un fichier audio qui simule le son de douleur approprié est diffusé via le module DFPlayer Mini relié à un haut-parleur afin de fournir un retour sonore et la meilleure méthode pour simuler la douleur abdominale, et, si la défense abdominale est activée, quatre moteurs vibrants situés sous la maquette sont enclenchés pendant trois secondes pour reproduire ce signe physiologique. L'alimentation du système est assurée par un bloc comprenant une batterie et un régulateur LM7805, fournissant une tension stabilisée de 5 V aux capteurs, au module audio et aux moteurs. L'ensemble est coordonné par l'Arduino, qui gère la lecture des capteurs, la commande des indicateurs lumineux, des moteurs et du système audio, offrant ainsi une solution interactive et réaliste pour l'apprentissage de la palpation abdominale en simulation médicale.

➤ **Bloc 01 : Unité centrale (Arduino Méga)**

L'Arduino Méga constitue le cœur du dispositif. Il est basé sur un microcontrôleur ATmega2560 et se distingue par ses 54 broches numériques, dont 15 PWM, ainsi que 16 entrées analogiques, ce qui en fait une solution adaptée aux projets nécessitant un grand nombre d'entrées/sorties [15]. Dans notre système, il gère plusieurs fonctions :

- La lecture des signaux provenant des 9 capteurs FSR (via les entrées analogiques A0-A8), permettant de détecter la zone abdominale sollicitée.
- L'activation des indicateurs lumineux (LED rouge/verte) pour fournir un retour visuel sur l'état de la simulation.
- Le pilotage des moteurs vibrants pour simuler la défense abdominale.
- La gestion de la communication avec le module DFPlayer Mini pour déclencher les sons éducatifs.

- La réception et l'interprétation des commandes via l'interface utilisateur connectée par USB (communication série), permettant ainsi la configuration ou la commande en temps réel depuis un ordinateur.

Ce choix s'explique par la nécessité d'un grand nombre d'entrées analogiques pour connecter 9 capteurs, ce qui n'est pas possible avec une carte Arduino Uno (seulement 6 entrées analogiques).



Figure 15 [25] : Arduino Méga



Figure 16 [16] : ATmega2560

➤ Bloc 02 : Bloc Capteurs

Le bloc capteurs est constitué de neuf capteurs FSR (Force Sensitive Resistor) disposés sur la surface simulant l'abdomen et reliés chacun en diviseur de tension avec une résistance de **1 k Ω** .

- Définition et rôle des capteurs FSR :

Un capteur de force résistif (Force Sensing Resistor, FSR) est un dispositif électronique dont la résistance électrique varie en fonction de la pression ou de la force exercée sur sa surface. Il est

généralement constitué d'un polymère conducteur, appliqué sous forme de couche ou d'encre, dont la résistivité change sous contrainte mécanique.

Le principe de fonctionnement repose sur un matériau composite, composé d'un mélange de particules conductrices et isolantes intégrées dans une matrice polymère. Lorsque l'utilisateur exerce une pression, ces particules se rapprochent, augmentant le nombre de points de contact avec les électrodes et diminuant ainsi la résistance électrique.

Les principaux avantages des FSR incluent :

- Faible coût et simplicité de mise en œuvre,
- Épaisseur réduite (environ 0,5 mm),
- Bonne robustesse mécanique et résistance aux chocs. [17]

Dans notre circuit, le FSR est utilisé pour détecter la force de palpation appliquée sur le simulateur. Il est associé à une résistance fixe de 1 k Ω dans un montage diviseur de tension.

- **Choix de la résistance (1 k Ω) :**

Le choix d'une résistance faible (1 k Ω) est motivé par les caractéristiques présentées dans la documentation constructeur : plus la résistance est faible, plus la plage de mesure devient large et la courbe tension-force plus linéaire. Cela permet d'éviter la saturation rapide et d'obtenir une réponse exploitable même pour des forces faibles, ce qui est crucial pour simuler la palpation médicale. À l'inverse, une résistance élevée (par exemple 10 k Ω) augmente la sensibilité mais réduit drastiquement la plage, rendant le système inadapté à des mesures variées.



Figure 17 : capteur FSR

➤ **Bloc audio : DFPlayer Mini avec haut-parleur**

- **Description du module DFPlayer Mini**

Le **DFPlayer Mini** (figure 15) est un module compact conçu pour la lecture de fichiers audio au format MP3. Il intègre une sortie audio simplifiée permettant une connexion directe à un haut-parleur. Ce module peut fonctionner en mode autonome à l'aide d'une alimentation, d'un haut-parleur et de boutons-poussoirs, ou être intégré à des systèmes pilotés par microcontrôleurs tels qu'Arduino, ESP32 ou Raspberry Pi via une interface UART.

- **Caractéristiques techniques :**

- **Taux d'échantillonnage pris en charge :** 8, 11,025, 12, 16, 22,05, 24, 32, 44,1 et 48 kHz.
- **Convertisseur numérique-analogique (DAC) :** 24 bits, plage dynamique de 90 dB, rapport signal/bruit (SNR) de 85 dB.
- **Compatibilité système de fichiers :** FAT16 et FAT32 ; prise en charge jusqu'à 32 Go pour carte TF, 32 Go pour U-disk et 64 Mo pour NORFLASH.
- **Modes de contrôle :** E/S (I/O), mode série (UART) et commande par boutons analogiques (AD).
- **Fonctionnalités supplémentaires :** pause publicitaire (arrêt temporaire de la musique pour lecture d'un message puis reprise), organisation des fichiers par dossiers (jusqu'à 100 dossiers, 255 fichiers par dossier).
- **Réglage audio :** 30 niveaux de volume et égaliseur réglable sur 6 niveaux.
- **Tension d'alimentation :** DC 3,2 V à 5 V.
- **Dimensions :** 20 mm × 20 mm.
- **Poids :** 20 g [15].

- **Principe de fonctionnement :**

Le DFPlayer reçoit des commandes via l'Arduino par une liaison série (TX/RX). Une fois la commande envoyée, le module accède au fichier audio approprié sur la carte microSD et l'amplifie pour l'envoyer au haut-parleur. Une résistance (environ 1 kΩ) peut être insérée entre la broche TX de l'Arduino et la broche RX du DFPlayer pour limiter le courant.

Rôle dans le projet :

Dans ce projet, le DFPlayer Mini a pour rôle de **générer un son simulant la douleur** lorsque le capteur FSR détecte une pression. Il est connecté à un haut-parleur pour restituer un son réaliste,

ce qui augmente l'interactivité et le réalisme du simulateur.

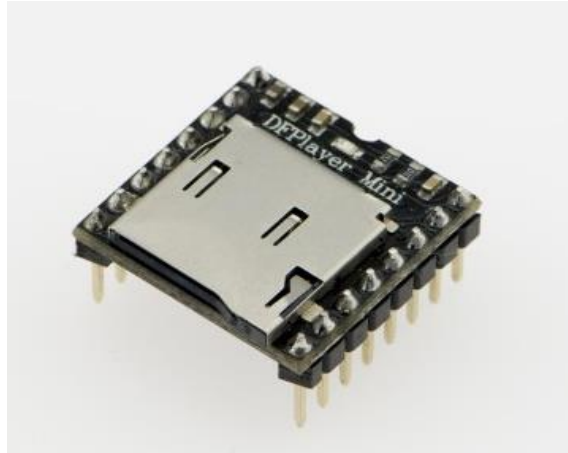


Figure 18 [18] :DFplayer mini

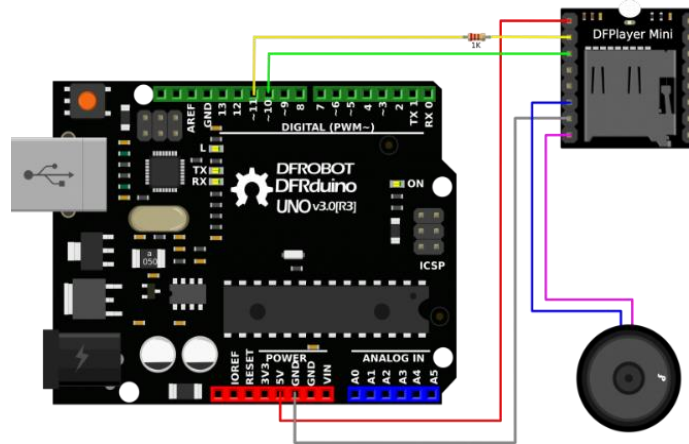


Figure 19 [18] : le branchement de DFplayer mini avec Arduino et haut-parleur

➤ Bloc indicateurs (LEDs)

Une diode électroluminescente (LED, *Light Emitting Diode*) est un composant optoélectronique qui émet de la lumière lorsqu'un courant électrique la traverse en polarisation directe. Elle est largement utilisée comme indicateur lumineux dans les systèmes électroniques en raison de sa faible consommation d'énergie et de sa longue durée de vie [19].

- Choix du composant :

Les LEDs ont été choisies pour leur simplicité d'intégration, leur coût réduit et leur

capacité à fournir une indication visuelle immédiate. Deux couleurs distinctes sont utilisées :

- **LED verte** pour signaler que la maquette est on alimentation et l'absence de douleur détectée.
- **LED rouge** pour signaler la détection de douleur.

L'utilisation d'un écran LCD a été écartée en raison de sa complexité et de son coût plus élevé, qui ne se justifient pas pour une simple indication binaire.

- Rôle dans le circuit :

Les LEDs sont connectées aux broches numériques 9 et 10 de la carte Arduino Méga et commandées par le programme. Elles permettent à l'utilisateur d'identifier rapidement l'état du simulateur, garantissant ainsi une meilleure interaction avec le dispositif.

➤ **Bloc des actionneur(vibration) :**

Ce sous-système regroupe quatre moteurs vibrants installés sous la maquette. Il a pour fonction de reproduire la défense abdominale, phénomène physiologique correspondant à une contraction réflexe des muscles face à la douleur. Ces moteurs, connectés aux sorties numériques de l'Arduino MEGA et alimentés par la source régulée à 5 V, s'activent simultanément pendant une seconde lorsque la pression exercée dépasse le seuil défini et que l'option est activée. Ce dispositif offre un retour haptique réaliste, permettant à l'apprenant de percevoir la rigidité simulée.

➤ **Bloc Alimentation Commune**

L'alimentation est un élément essentiel du système, car elle permet de fournir une tension stable et adaptée aux différents composants électroniques. Dans ce projet, nous avons utilisé :

- **Deux piles lithium-ion (3,7 V, 2600 mAh)**

• **Définition** :

Les batteries **Li-ion** (Lithium-ion)(figure 17) sont des accumulateurs rechargeables qui utilisent le lithium comme élément actif pour le stockage de l'énergie. Elles sont largement utilisées dans les systèmes portables en raison de leur haute densité énergétique et de leur faible autodécharge. [20]

• **Caractéristiques principales :**

- Tension nominale : 3,7 V
- Capacité : 2600 mAh
- Rechargeable, longue durée de vie, haute densité énergétique.

- **Rôle dans le projet :**

Deux piles de 3,7 V connectées en **série** fournissent une tension totale d'environ **7,4 V**, ce qui est suffisant pour alimenter le régulateur LM7805 et garantir une alimentation stable pour l'Arduino et les autres modules.

- **Pourquoi ce choix ?**

Les batteries Li-ion sont compactes, légères et offrent une capacité suffisante pour alimenter le système pendant plusieurs heures.

- **Régulateur de tension LM7805**

- **Définition** :

Le **LM7805**(figure 18) est un régulateur de tension linéaire qui fournit une tension de sortie **régulée à 5 V**, à partir d'une tension d'entrée plus élevée (dans notre cas, 7,4 V issue des batteries). Il est conçu pour délivrer un courant jusqu'à 1 A [21].

- **Principe de fonctionnement :**

Le LM7805 réduit la tension en dissipant l'excédent sous forme de chaleur. Il maintient une tension fixe de 5 V même lorsque la tension d'entrée varie entre 7 V et 25 V.

- **Rôle dans le projet :**

Il alimente la carte Arduino Méga, le DFPlayer Mini, ainsi que les capteurs et actionneurs nécessitant 5 V.

- **Pourquoi ce choix ?**

Le LM7805 est simple à utiliser, peu coûteux, largement disponible et capable de fournir un courant suffisant pour notre application.



Figure 20 [4] : piles lithium-ion

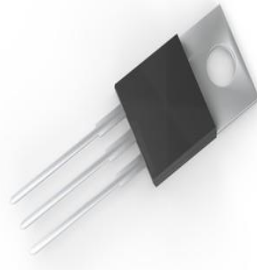


Figure 21 [4] : LM7805

➤ **Bloc Interface Utilisateur**

Le bloc d'interface utilisateur constitue un élément essentiel du système, car il assure la liaison entre l'utilisateur et la maquette de simulation. Il a pour fonction principale de permettre à l'opérateur (professeur) de configurer les paramètres cliniques avant de déclencher la simulation. Grâce à cette interface, il est possible de sélectionner les régions abdominales sur lesquelles la palpation sera simulée, de définir l'intensité de la pression (légère pour une douleur superficielle ou profonde pour une douleur plus marquée) et d'indiquer la présence ou l'absence d'une défense abdominale.

L'interface offre également une case à cocher permettant d'activer toutes les zones simultanément, ce qui simplifie les scénarios nécessitant une simulation globale. Les éléments visuels sont organisés de manière ergonomique : une zone défilement pour le choix des régions, des boutons radio pour la sélection des paramètres cliniques, et un bouton d'envoi qui transmet la configuration vers la carte Arduino Méga via une liaison série. Cette communication est réalisée en encodant les paramètres sous forme de texte structuré.

En plus de la configuration, ce bloc offre un retour visuel en temps réel à travers une étiquette de statut qui informe l'utilisateur de la réussite ou de l'échec de la transmission. Ainsi, ce bloc ne se limite pas à une simple interface, mais constitue un module de contrôle centralisé qui garantit une interaction fluide et fiable avec le matériel, tout en réduisant le risque d'erreur humaine lors de la préparation de la simulation.

Pour le développement de cette interface, nous avons opté pour la bibliothèque **CustomTkinter**, une extension moderne de Tkinter, la bibliothèque graphique native de Python. Tkinter, bien que simple et intégrée par défaut, présente des limitations importantes en termes de personnalisation et de design : ses widgets sont basiques et peu adaptés à des interfaces professionnelles ou pédagogiques. CustomTkinter, en revanche, apporte des fonctionnalités avancées, comme la

gestion des thèmes clairs et foncés, l'utilisation de palettes de couleurs personnalisées, la possibilité de créer des widgets arrondis, ainsi qu'une meilleure ergonomie globale [22]. Cette bibliothèque propose des widgets modernes tels que des frames personnalisables, des boutons stylisés, des cases à cocher, des barres défilantes et des composants interactifs, ce qui permet d'obtenir une interface esthétique, intuitive et adaptée à un usage clinique. Dans le cadre de notre projet, le choix de CustomTkinter se justifie par la nécessité d'offrir une expérience utilisateur agréable et efficace, réduisant la complexité de navigation et améliorant la lisibilité des options. De plus, la compatibilité avec Python et la simplicité d'intégration avec des bibliothèques comme serial en font un outil idéal pour concevoir une interface communicante avec un microcontrôleur. En résumé, CustomTkinter combine esthétique, simplicité de codage et adaptabilité, des critères essentiels pour une solution pédagogique interactive.

II.3.2.2 Schéma fonctionnel du dispositif :

Le circuit global développé a pour objectif de simuler des réponses physiologiques lors de la palpation abdominale, en reproduisant la perception de douleur et la défense abdominale dans un contexte pédagogique. Cette architecture repose sur une carte Arduino MEGA assurant la commande numérique, l'acquisition des signaux issus des capteurs et la gestion des actionneurs. Le système intègre plusieurs modules : un ensemble de capteurs FSR répartis sur neuf régions anatomiques pour détecter la pression, un module audio DFPlayer Mini pour la génération des signaux sonores, des indicateurs lumineux (LEDs) pour l'affichage visuel, et quatre moteurs vibrants pour la simulation de la défense abdominale. L'alimentation est assurée par un bloc constitué d'une batterie et d'un régulateur LM7805 fournissant une tension stabilisée de 5 V à l'ensemble des composants. Le schéma fonctionnel, illustré à la figure 6, met en évidence l'interconnexion entre ces différents blocs afin de garantir une interaction réaliste entre la détection de la pression et la réponse multimodale (visuelle, sonore et vibratoire), contribuant ainsi à l'apprentissage des techniques de palpation abdominale en simulation clinique.

Le schéma fonctionnel a été élaboré sur la plateforme Tinkercad, un outil en ligne développé par Autodesk permettant la conception et la simulation de circuits électroniques sans nécessiter d'installation locale [23]. En raison des limitations de la plateforme, la simulation de circuit a été effectuée avec une carte Arduino UNO et six capteurs FSR, tandis que dans le dispositif réel, nous avons utilisé un Arduino MEGA associé à neuf capteurs FSR.

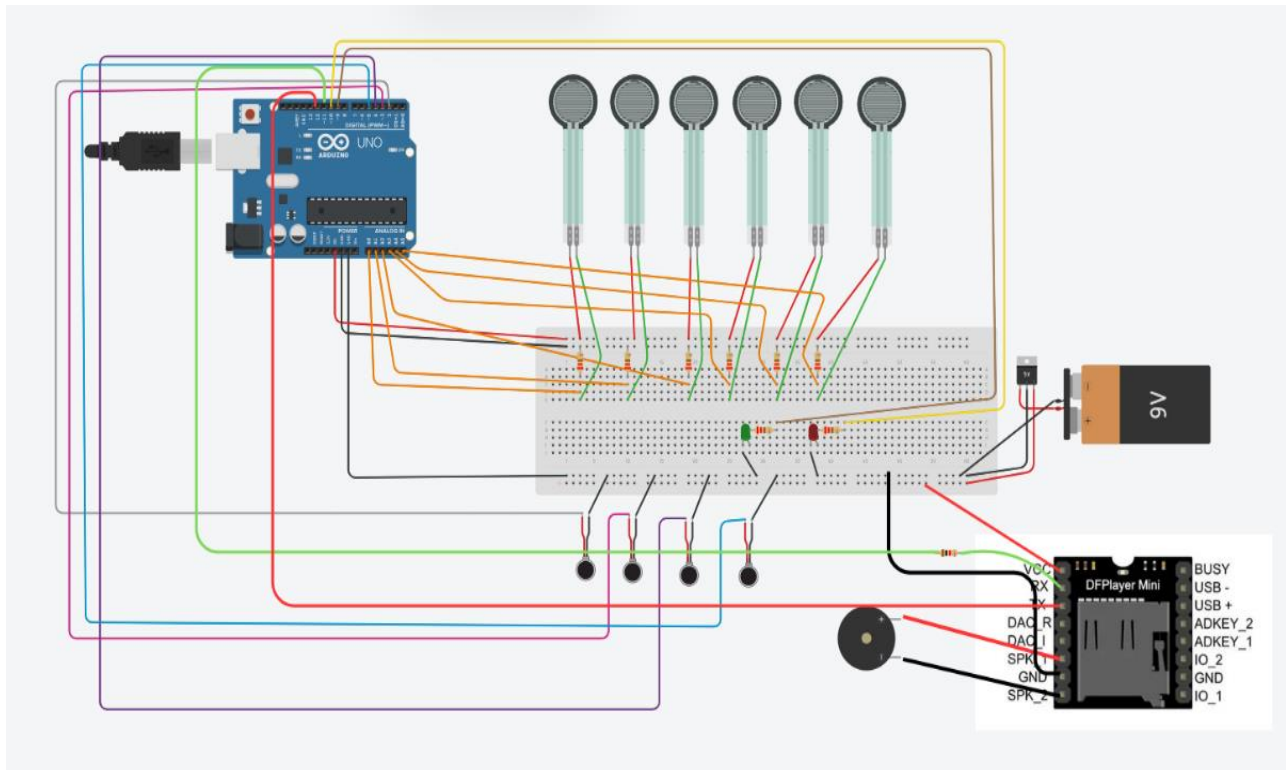


Figure 22 Schéma fonctionnel du dispositif

II.3.3 Simulation de la contracture musculaire

La contracture abdominale est un phénomène clinique caractérisé par une contraction involontaire et persistante des muscles de la paroi abdominale, souvent déclenchée par une inflammation péritonéale ou une irritation sous-jacente. Ce signe est particulièrement important lors de l'examen clinique, car il ne peut être contrôlé par la volonté du patient et traduit généralement une situation nécessitant une attention médicale immédiate. Pour la formation pratique des étudiants en médecine, il est donc essentiel de pouvoir reproduire cette sensation de manière réaliste, afin de leur permettre de développer leurs compétences palpatoires et d'apprendre à reconnaître la contracture lorsqu'elle se présente en contexte réel.

Dans notre prototype, nous avons pensé à simuler la contracture abdominale en plaçant des sacs gonflables gonflés avec une poire de gonflage, sous la couche externe de silicone. Cette solution offre une grande souplesse pédagogique : en modulant le niveau de gonflage, il est possible de reproduire différents degrés de rigidité abdominale, allant d'une contracture à une rigidité diffuse

traduisant une atteinte plus grave. Ainsi, l'étudiant est confronté à une variété de situations proches de la réalité clinique, ce qui favorise l'acquisition progressive de réflexes palpatoires fiables.

L'intégration de ce système permet également d'obtenir un abdomen dont la texture reste proche de celle du corps humain au repos, mais qui peut se transformer en une surface dure et résistante lorsque les sacs sont gonflés. Cette variation, perceptible immédiatement lors de la palpation, constitue un indicateur pédagogique précieux pour distinguer la contracture abdominale d'autres modifications musculaires.

En résumé, le recours à des sacs gonflables sous la couche de silicone rend la simulation plus réaliste et modulable, tout en préservant la simplicité d'utilisation du prototype. Ce choix contribue à offrir aux étudiants une expérience sensorielle riche et précise, essentielle pour renforcer leur mémoire tactile et leur capacité à identifier correctement une contracture abdominale lors d'un examen clinique.



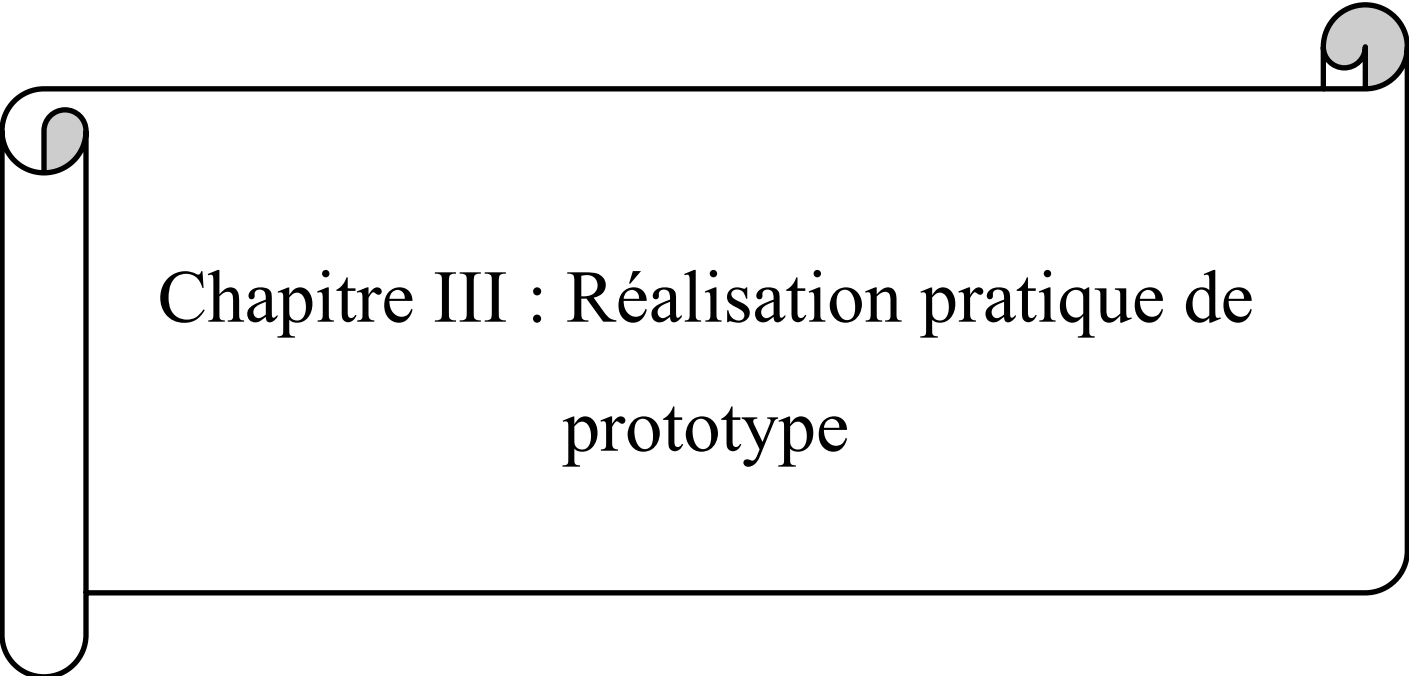
Figure 23 :sac gonflable

II.4 Récapitulation

Ce chapitre a présenté en détail les différentes étapes de conception et d'intégration qui ont permis de définir un modèle interactif destiné à la simulation de l'examen clinique d'un abdomen douloureux. Tout au long de ce processus, l'objectif principal a été de traduire les besoins pédagogiques identifiés en un dispositif concret et fonctionnel, capable d'offrir une expérience d'apprentissage réaliste et sécurisée. Pour y parvenir, une réflexion approfondie a été menée sur la structure du simulateur, le choix des matériaux et la manière dont chaque élément devait interagir pour reproduire les caractéristiques physiques d'un abdomen humain. Le mannequin a ainsi été pensé de façon à intégrer plusieurs couches, chacune ayant un rôle spécifique dans la restitution des sensations liées à la palpation. Le choix de matériaux comme l'éponge et le silicone s'est révélé déterminant pour obtenir une combinaison optimale entre souplesse, résistance et durabilité.

Au-delà de l'aspect technique, cette conception a été guidée par une volonté d'apporter une réelle valeur ajoutée à la formation médicale. En effet, l'apprentissage de l'examen clinique repose largement sur la pratique et la répétition, ce qui nécessite des outils pédagogiques fiables et accessibles. La maquette conçue vise à répondre à ce besoin en permettant aux étudiants et professionnels de santé de s'exercer dans des conditions proches de la réalité, sans aucun risque pour les patients. Elle représente également une solution locale et modulaire, adaptée aux contraintes budgétaires et logistiques des centres de formation, tout en restant évolutive pour intégrer de futures améliorations.

Ce travail de conception constitue une étape fondamentale dans la réalisation du projet. Il a permis de définir avec précision les composants et les interactions nécessaires pour passer de l'idée à un prototype tangible. En structurant l'ensemble des choix techniques et pédagogiques, cette étape a jeté les bases pour lancer la fabrication du simulateur dans de bonnes conditions, en anticipant les défis potentiels et en optimisant les ressources. Ainsi, la conception réalisée dans ce chapitre marque le passage de la réflexion théorique à la concrétisation pratique, ouvrant la voie à la mise en place d'un outil de formation innovant, durable et adapté aux besoins réels de l'apprentissage médical.



Chapitre III : Réalisation pratique de prototype

III. Chapitre 03 : Réalisation pratique de prototype

III.1 Conception et moulage de la couche de silicone

La réalisation du prototype a commencé par une étape clé : donner forme à la couche externe qui devait imiter la peau de l'abdomen. Pour cela, nous avons utilisé un mannequin vestimentaire comme base anatomique. Il servait de modèle sur lequel nous allions façonner notre moule.

Nous avons d'abord recouvert la partie thoraco-abdominale du mannequin avec du plâtre. Pour que ce plâtre soit plus solide et ne se fissure pas, nous y avons intégré de la filasse (fibrine de lin), un matériau simple mais efficace qui joue un rôle d'armature. Une fois le plâtre sec après 3 heures, nous avons corrigé les petites imperfections, notamment les bulles d'air, en rebouchant soigneusement les cavités avec du plâtre frais.

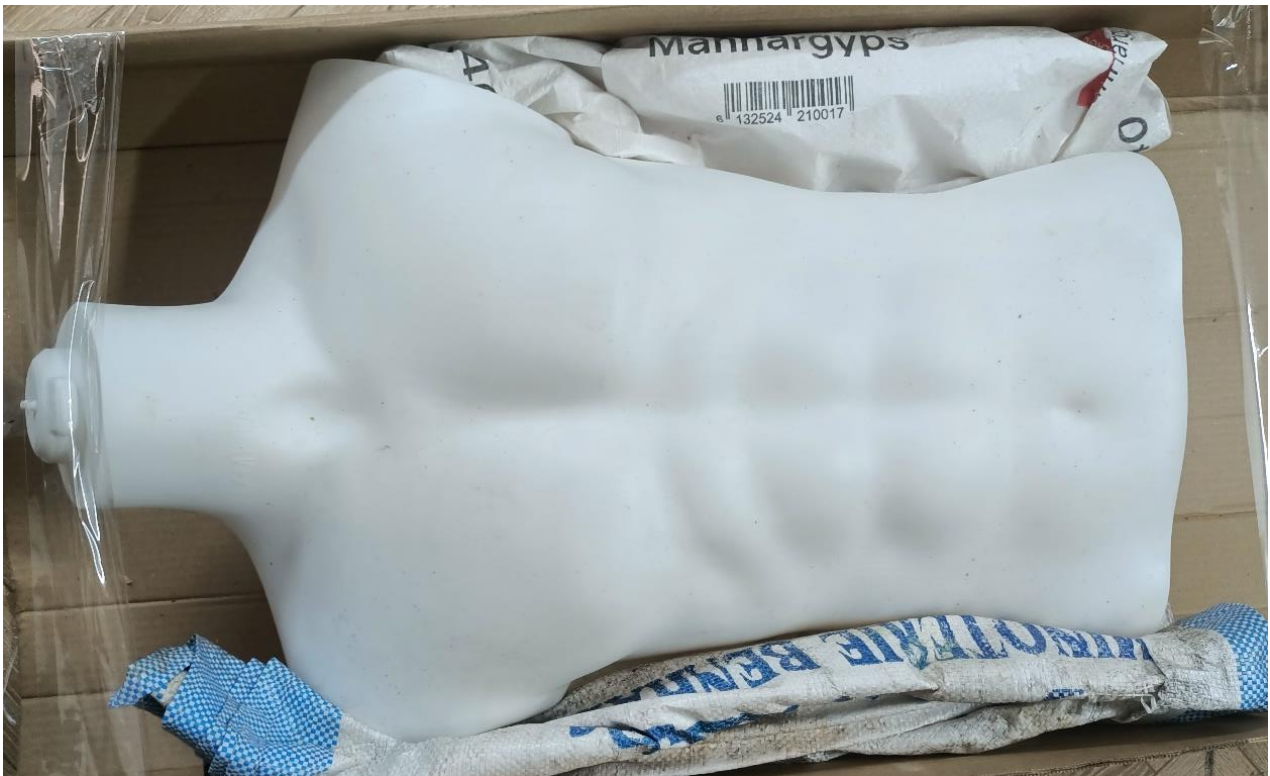


Figure 24 : base de maquette



Figure 25 : fabrication de moule

Quand le moule était prêt, nous avons appliqué une fine couche isolante (mélange d'essence et de cire liquide) afin d'éviter que le silicone n'adhère au plâtre. Ce détail est important : sans isolant, il aurait été presque impossible de retirer correctement la pièce finale.



Figure 26 : résultat finale de moule

Le silicone que nous avons choisi est un **silicone A15**, réputé pour sa souplesse et sa résistance. Il est particulièrement adapté pour reproduire l'élasticité de la peau. La préparation consistait à mélanger 1 kg de silicone avec 20 g de catalyseur, puis à ajouter un colorant en poudre pour obtenir une teinte plus réaliste. Nous avons veillé à bien homogénéiser le mélange pour éviter la présence de bulles.

La réalisation de la couche en silicone a nécessité plusieurs étapes successives, chacune pensée pour obtenir une pièce à la fois réaliste, solide et facilement intégrable à la maquette. Tout d'abord, une première couche de silicone a été préparée puis versée dans le moule. Elle a été soigneusement étalée de manière uniforme sur l'ensemble de la surface afin de reproduire le plus fidèlement possible la forme et les détails du torse et de l'abdomen. Cette première couche joue un rôle essentiel, car c'est elle qui définit la finesse de la peau artificielle et assure l'adhérence des couches suivantes. Une fois posée, nous avons renforcé cette base par l'ajout de compresses appliquées directement sur le silicone encore frais. Les compresses permettent au matériau de conserver une meilleure cohésion interne et évitent que la pièce ne devienne trop fragile ou sujette aux déchirures lors des manipulations répétées.

Après ce renfort, une seconde couche de silicone a été coulée par-dessus afin de consolider l'ensemble et de commencer à donner plus d'épaisseur à la structure. À ce stade, nous avons inséré des bandes de scratch au niveau des périphéries, entre les couches. L'objectif de cette intégration n'était pas de maintenir temporairement les couches entre elles, mais bien de préparer un système d'attache permanent. Grâce à ces scratches intégrés, la peau en silicone pourra être fixée et retirée facilement de la maquette une fois durcie, ce qui facilite l'entretien, les ajustements et même d'éventuels remplacements futurs sans devoir reconstruire toute la pièce.

Pour améliorer encore le réalisme tactile, une éponge a été placée à certains endroits entre les couches. Cette éponge confère un léger volume et une élasticité supplémentaire, donnant à la surface une sensation plus proche de celle du tissu abdominal humain lors de la palpation. Enfin, une troisième couche de silicone est venue recouvrir l'ensemble. Elle a permis d'homogénéiser la surface, de bien protéger les éléments internes (compresses, scratches, éponge) et de donner à la pièce son aspect final.

L'ensemble a été laissé à sécher naturellement à l'air libre jusqu'à durcissement complet jusqu'à 72 heures. Ce temps de séchage est indispensable, car il garantit la solidité et la stabilité de la structure. Le résultat obtenu est une couche de silicone souple mais robuste, imitant de manière réaliste la peau de l'abdomen tout en étant fixable sur la maquette grâce aux scratches périphériques. Cette solution permet d'allier esthétique, réalisme tactile et praticité d'utilisation dans le cadre des exercices de simulation clinique.

Les étapes de réalisation de couche de silicone et résultat sont illustré dans les figures suivantes



Figure 27 : versement de silicone et mettre de l'éponge sur le moule



Figure 28 : mise on place des sangles



Figure 29 : couverture par bandage



Figure 30 : résultat finale

III.2 Assemblage et câblage du circuit électronique

Pour la partie électronique, nous avons choisi d'utiliser une breadboard comme base de montage. Ce choix s'explique par la nature même du projet, qui nécessite de connecter un grand nombre de composants et de capteurs à une alimentation commune, tout en permettant des modifications rapides et faciles lors de la phase de prototypage. La breadboard nous a donc offert une plateforme pratique pour regrouper, organiser et tester l'ensemble des connexions avant une éventuelle intégration sur un circuit imprimé définitif.

Le cœur du système repose sur neuf capteurs de type FSR (Force Sensing Resistor), répartis stratégiquement sur la surface abdominale de la maquette. Chaque capteur correspond à une région spécifique, ce qui permet de reproduire les différentes zones anatomiques observées lors d'un examen clinique. Ces capteurs ont été intégrés directement sous-dessus de la couche de silicone moulée, de manière à pouvoir détecter la pression exercée par l'utilisateur lorsqu'il palpe une zone particulière.

En complément, quatre moteurs vibrants ont été installés dans différentes parties de l'abdomen. Leur rôle est de simuler la réaction corporelle de défense abdominale, qui doit apparaître de façon diffuse sur plusieurs zones. La répartition des moteurs permet de reproduire une réponse musculaire réaliste lorsque le médecin applique une pression, renforçant ainsi le caractère interactif et pédagogique de la maquette.

Un module DFPlayer Mini a été intégré au montage pour générer des retours sonores. Ce module est directement relié à un haut-parleur placé à l'intérieur de la tête du mannequin, au niveau de la bouche, afin de simuler des gémissements ou des plaintes vocales lorsque l'étudiant exerce une palpation douloureuse. Cette disposition rend l'expérience plus immersive, car le son semble provenir naturellement du patient simulé.

Les **LEDs** sont fixées dans la partie des yeux. Tu en as deux : une LED verte et une LED rouge. Leur rôle est de fournir un retour visuel simple et immédiat. La LED verte s'allume lorsqu'il n'y a pas de douleur détectée. En revanche, la LED rouge s'allume pour signaler la présence de douleur, ce qui alerte l'utilisateur que la zone pressée est sensible. Ce double système lumineux complète les signaux sonores et vibratoires, créant une multimodalité de feedback.

L'ensemble du système est coordonné par une carte Arduino Méga, choisie pour sa capacité à gérer un grand nombre d'entrées/sorties numériques et analogiques. Elle assure la lecture des signaux envoyés par les capteurs FSR et pilote en retour les moteurs, les LED ainsi que le module DFPlayer. Les connexions principales sont établies comme suit : le DFPlayer est relié aux broches numériques 16 et 17 pour la communication série, les LED sont branchées aux broches 9 (verte) et 10 (rouge), tandis que les moteurs vibrants sont connectés aux broches 2, 3, 4 et 5.

L'alimentation de l'ensemble est assurée par deux piles lithium de 3,7 V montées en série, fournissant une tension nominale de 7,4 V. Cette tension est régulée par un circuit LM7805 afin d'obtenir une sortie stable de 5 V, nécessaire pour alimenter le DFPlayer et les moteurs vibrants. L'Arduino Mega, lui, accepte directement l'alimentation via son entrée prévue à cet effet. Un interrupteur général a été ajouté sur le circuit, permettant de couper l'alimentation de la maquette et ainsi sécuriser l'utilisation lors des phases de test ou de repos.

Enfin, ce système n'est pas autonome : il est piloté par une interface utilisateur. Concrètement, l'Arduino est relié à un ordinateur via un câble USB. L'utilisateur peut envoyer des commandes depuis l'interface, et l'Arduino exécute ces instructions pour activer les différents scénarios cliniques.

Cet assemblage et ce câblage électronique constituent donc le socle fonctionnel de la maquette. Chaque composant a été choisi pour sa compatibilité, sa simplicité d'intégration et son rôle complémentaire dans la simulation. L'organisation sur la breadboard garantit une structure claire et facilement modifiable, essentielle pour la phase expérimentale de développement

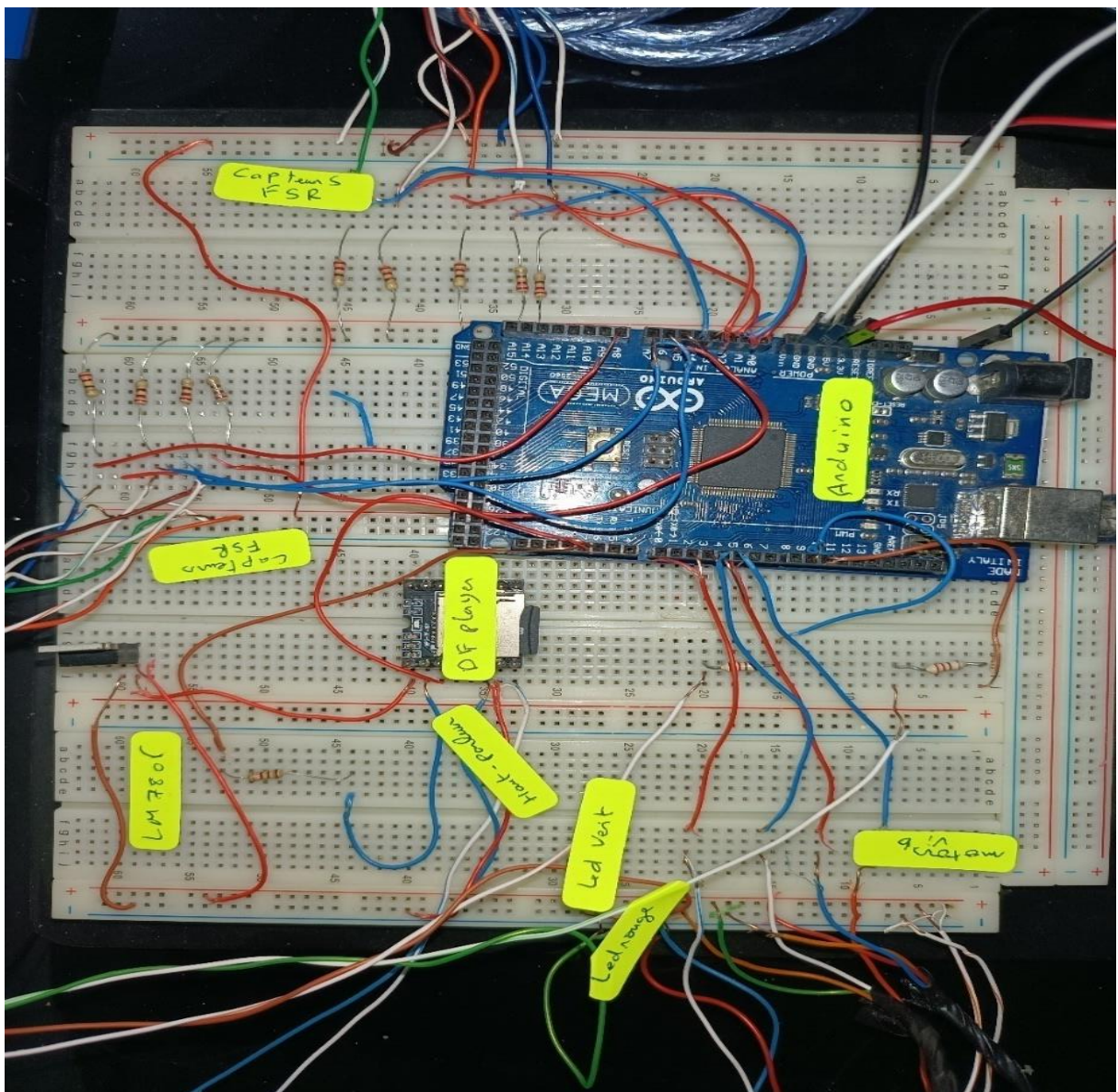


Figure 31 : circuit finale

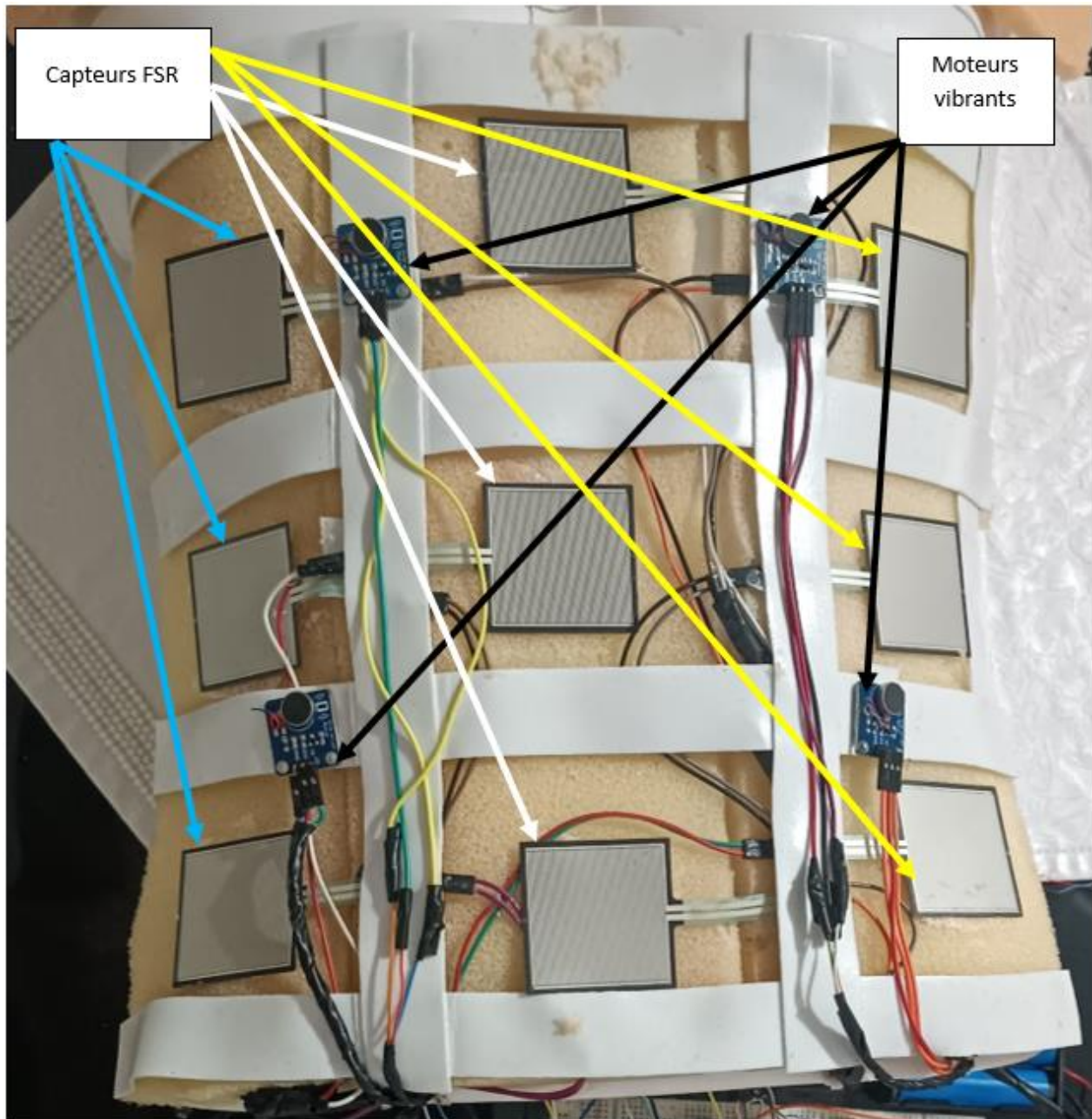


Figure 32: emplacement des capteurs et moteur sur la maquette

III.3 Calibration et validation des capteurs

La calibration des capteurs FSR de chaque région abdominale intégrés dans la maquette a été réalisée à travers une série de tests pratiques basés sur deux types de palpation : une pression légère, assimilée à une palpation superficielle, et une pression plus appuyée, correspondant à une palpation profonde. Chaque geste est enregistré en temps réel par l'Arduino, qui transmet les valeurs mesurées sur le traceur série. Ces données permettent d'établir, pour chaque capteur, deux seuils distincts de détection. Contrairement à une simple reconnaissance binaire, où seule une forte pression serait identifiée, le dispositif est capable de prendre en compte les deux niveaux d'intensité. Dans les deux cas, la palpation déclenche une réaction du système sous forme de signaux sonores, lumineux et vibrants. La différence repose sur l'ajustement des seuils, qui permet de distinguer la palpation superficielle de la palpation profonde et de les associer à des valeurs cohérentes de force. En s'appuyant sur les indications du constructeur du capteur FSR 406, les résultats numériques sont traduits en forces exprimées en Newton, rendant la maquette plus réaliste et pédagogique.

III.3.1 Calibration de capteur de région d'épigastre

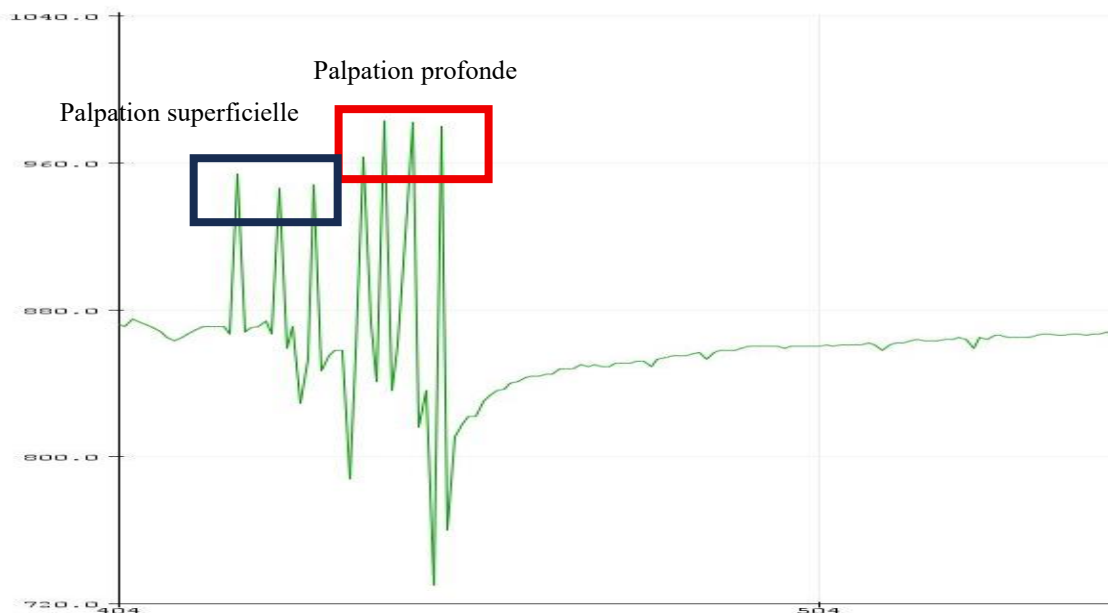


Figure 33 : Mesures enregistrées pour la région épigastrique lors des palpations superficielles et profondes

D'après les mesures obtenues via le traceur série de l'Arduino (figure 32), la valeur moyenne enregistrée lors d'une palpation superficielle est d'environ **950 CDM**, tandis qu'elle atteint approximativement **1000 CDM** pour une palpation profonde. Par ailleurs, la force exercée uniquement par la couche de silicone, sans interaction externe, génère une valeur d'environ **870 CDM**. Sur la base de ces résultats, il est possible de calculer les seuils de détection correspondant aux palpations superficielles et profondes dans la région d'épigastre.

D'après la datasheet de FSR406 :

$$V_{out} = \frac{R_M * V^+}{(R_M + R_{FSR})} \quad [23]$$

Avec :

V^+ : tension d'entrée.

V_{out} : tension de sortie.

R_M : résistance de charge.

R_{FSR} : résistance de capteur FSR.

- Pour trouver le seuil de force il faut trouver R_{FSR} puis nous effectuons la projection sur la courbe indiquée dans la figure suivante.

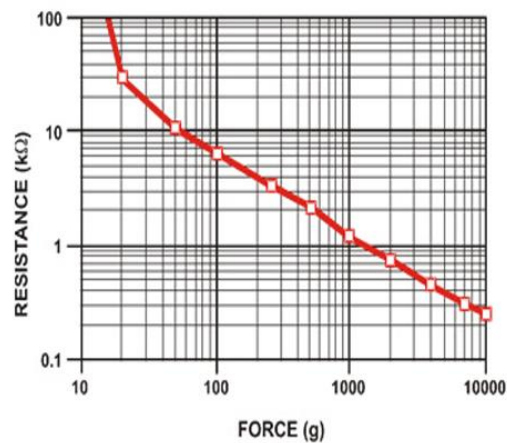


Figure 34 : courbe de résistance de FSR on fonction de force [23]

Calcul le seuil de force par newton (palpation superficielle) :

$$\text{-on a: } CDM = \frac{V_{out} * 1023}{V^+}$$

et : $CDM = CDM(\text{palpation superficielle}) - CDM(\text{couche de silicone})$

$$CDM = 950 - 870 = 70$$

$$\rightarrow V_{out} = \frac{CDM * V^+}{1023} = \frac{70 * 5}{1023} = 0.34 V$$

$$V_{out} = \frac{R_M * V^+}{(R_M + R_{FSR})}$$

$$\rightarrow R_{FSR} = R_M * \left(\frac{V^+}{V_{OUT}} - 1 \right) = 1000 * \left(\frac{5}{0.34} - 1 \right) = 13705 \Omega \approx 14 k\Omega$$

Avec la projection sur la figure 26 le seuil de palpation superficielle est :

A 14kΩ la force est 40 grammes force. On a :

$$F = m * g$$

Avec :

F=la force on Newton

m= la masse on kilogramme

g= est l'accélération de la pesanteur, 9.81 m/s

$$F(\text{seuil}) = 0.04 * 9.81 = 0.39 N$$

Alor le seuil de force de palpation superficielle est **0.39 Newton**.

Calcul le seuil de force par newton (palpation profonde) :

Avec les mêmes étapes de calcul précédant on obtient :

$$F(\text{seuil}) = 1.96N$$

Alor le seuil de force de palpation profonde est **1.96 Newton**.

III.3.2 Calibration de capteur de région hypocondre droite

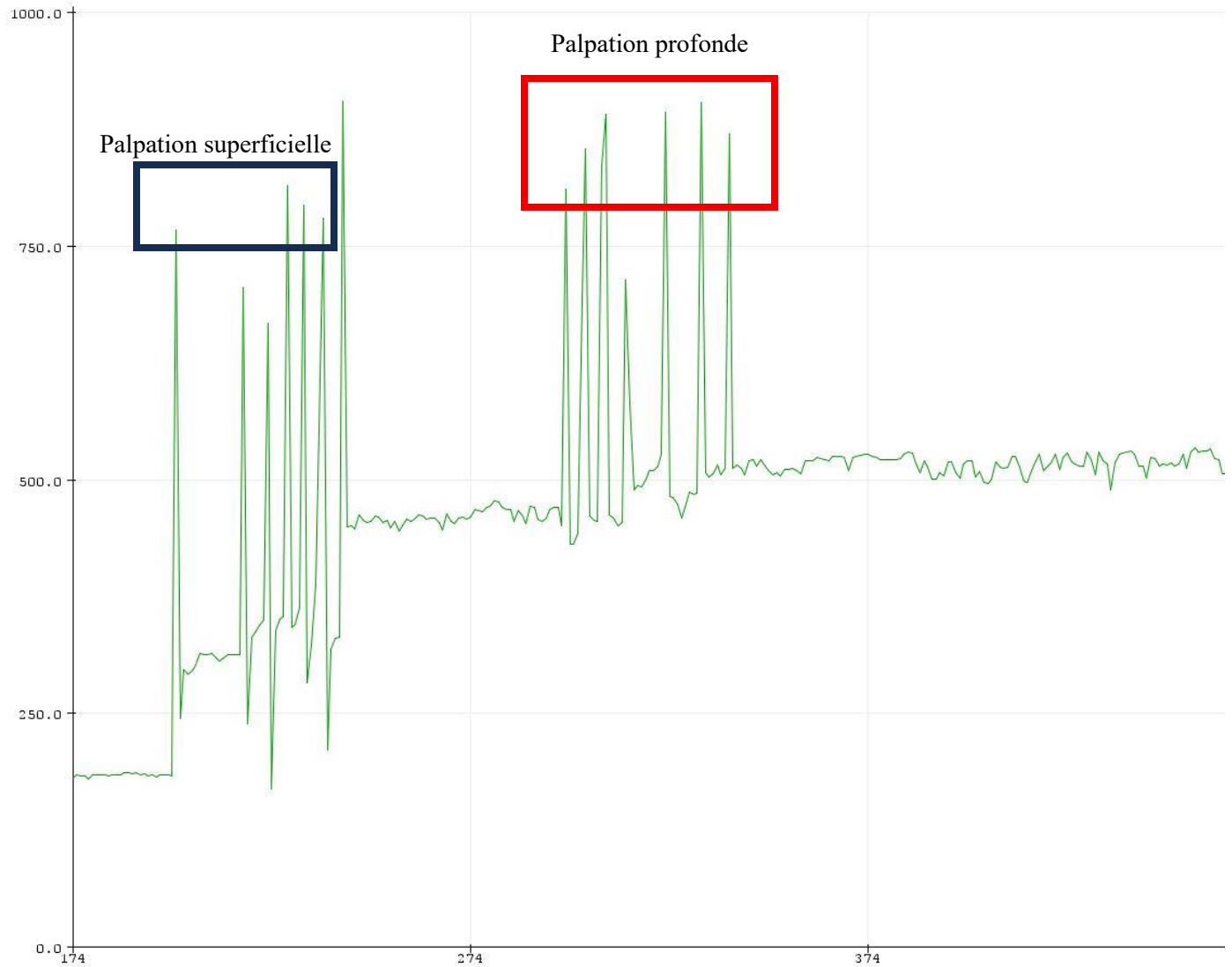


Figure 35 : Mesures enregistrées pour la région de l'hypocondre droit lors des palpations superficielles et profondes

D'après les mesures obtenues via le traceur série de l'Arduino (figure 34), la valeur moyenne enregistrée lors d'une palpation superficielle est d'environ **800 CDM** et la palpation profonde d'environ **900 CDM**, la force exercée uniquement par la couche de silicone, sans interaction externe, génère une valeur d'environ **500 CDM**. Avec les mêmes calculs précédents on obtient :

Le seuil de force par newton (palpation superficielle) :

$$F(\text{seuil}) = 3.92N$$

Calcul le seuil de force par newton (palpation profonde) :

$$F(\text{seuil}) = 6.86N$$

III.3.3 Calibration de capteur de région hypocondre gauche

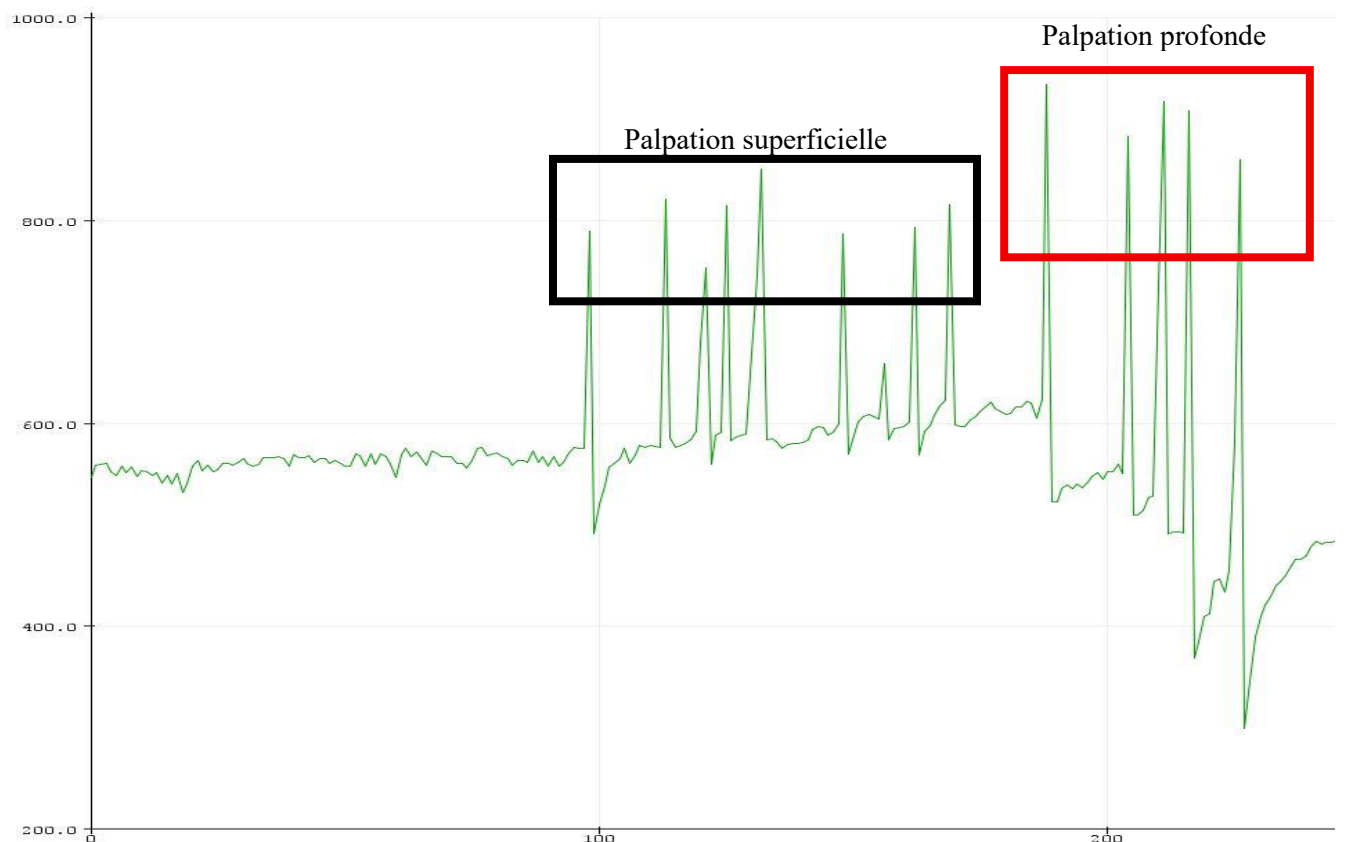


Figure 36 : Mesures enregistrées pour la région de l'hypocondre gauche lors des palpations superficielles et profondes

D'après les données affichées sur le traceur série de l'Arduino (figure 35), la valeur moyenne mesurée atteint environ **800 CDM** pour une palpation superficielle et **900 CDM** pour une palpation plus profonde. En comparaison, la simple pression exercée par la couche de silicone, sans aucune interaction externe, génère environ **580CDM**. En appliquant les calculs précédemment détaillés, ces valeurs permettent d'obtenir les résultats finaux :

Le seuil de force par newton (palpation superficielle) :

$$F(\text{seuil}) = 1.96N$$

Calcul le seuil de force par newton (palpation profonde) :

$$F(\text{seuil}) = 4.9N$$

III.3.4 Calibration de capteur de région ombilicale

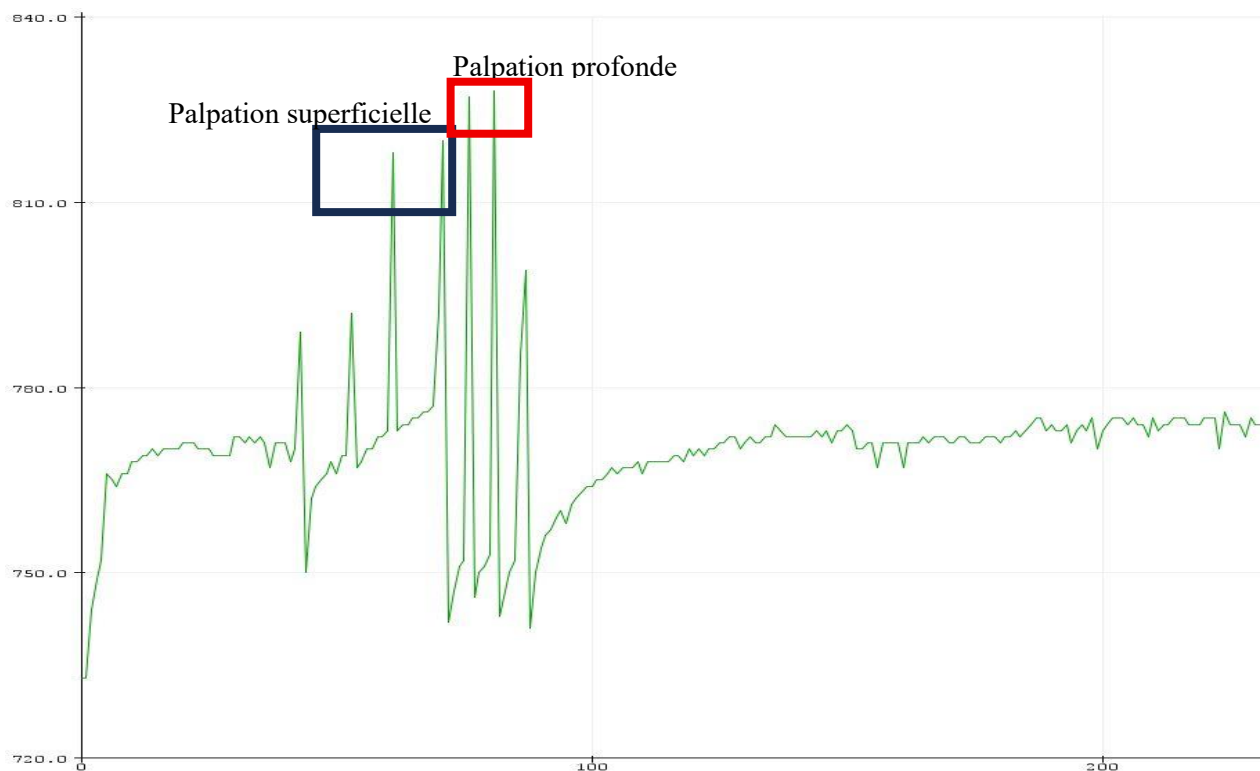


Figure 37 : Mesures enregistrées pour la région ombilicale lors des palpations superficielles et profondes

L'observation des mesures à l'aide du traceur série de l'Arduino (voir figure 37) révèle que la palpation superficielle génère une valeur moyenne proche de **700 CDM** alors qu'une palpation profonde se situe plutôt autour de **780 CDM**. À titre de comparaison, lorsque seule la couche de silicone exerce une force, la valeur relevée est d'environ **220 CDM**. En reprenant les calculs déjà utilisés, on peut en déduire les résultats souhaités.

Le seuil de force par newton (palpation superficielle) :

$$F(\text{seuil}) = 9N$$

Calcul le seuil de force par newton (palpation profonde) :

$$F(\text{seuil}) = 12N$$

III.3.6 Calibration de capteur de région Flanc gauche

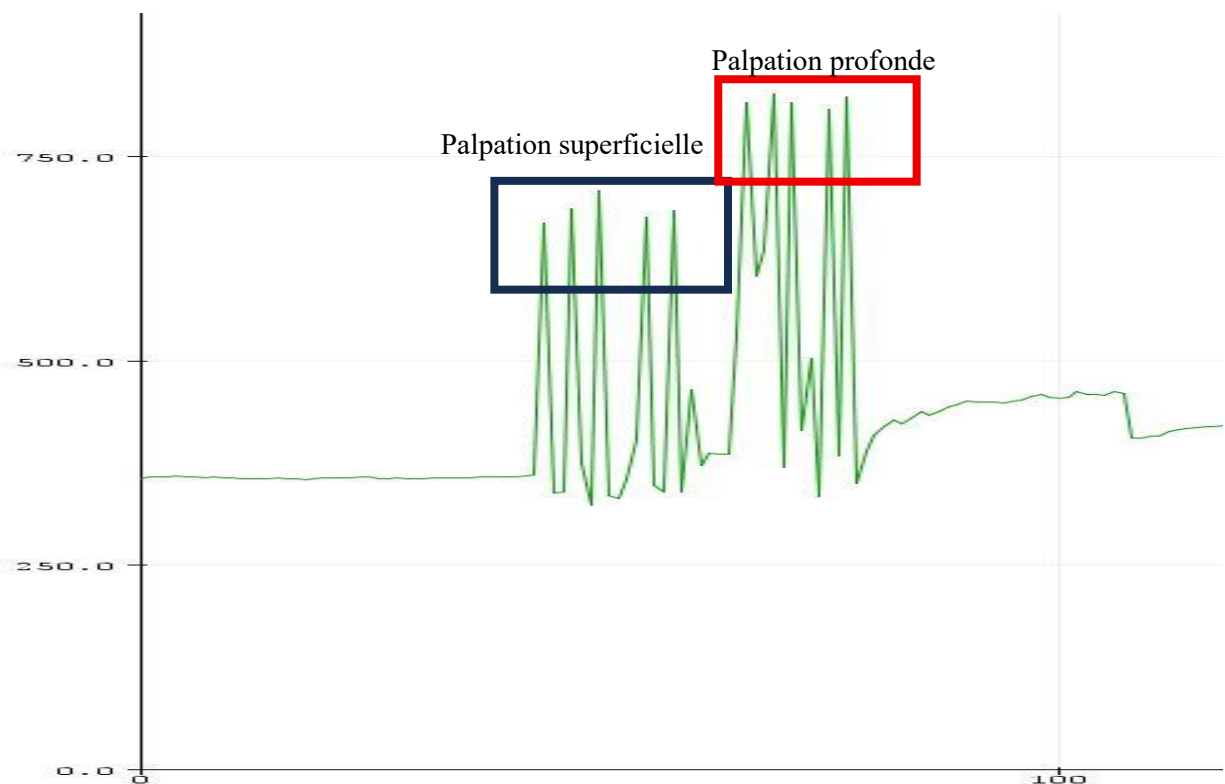


Figure 39 : Mesures enregistrées pour la région du flanc gauche lors des palpations superficielles et profondes

La figure 38, issue du traceur série de l'Arduino, illustre clairement la variation des mesures enregistrées. Ainsi, une palpation superficielle est associée à une valeur moyenne d'environ **700 CDM** tandis qu'une palpation plus intense atteint **800 CDM**, En l'absence de toute manipulation, la pression naturelle du silicone seul correspond approximativement à **300 CDM**. Les mêmes calculs appliqués à ces données donnent alors les résultats finaux.

Le seuil de force par newton (palpation superficielle) :

$$F(\text{seuil}) = 6.86N$$

Calcul le seuil de force par newton (palpation profonde) :

$$F(\text{seuil}) = 9.81N$$

III.3.7 Calibration de capteur de région hypogastre

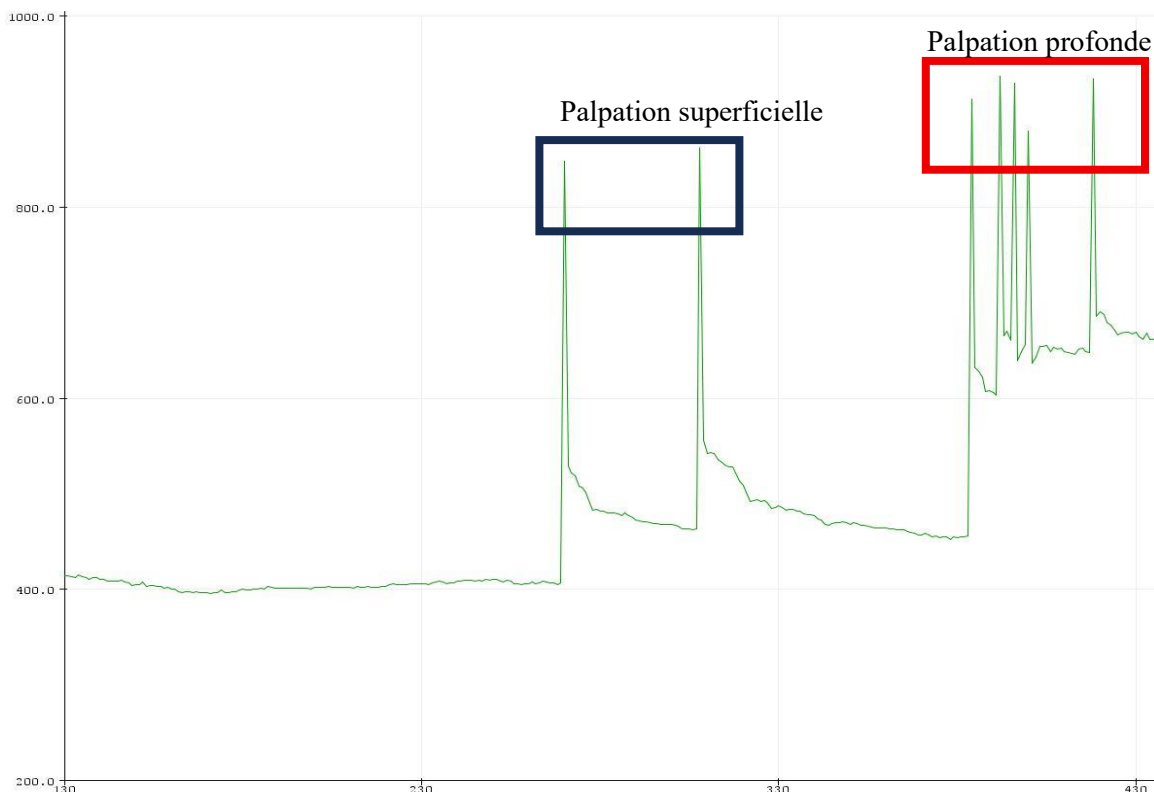


Figure 40 : Mesures enregistrées pour la région hypogastrique lors des palpations superficielles et profondes

À partir des relevés effectués avec le traceur série de l'Arduino (figure 39), on constate que la valeur moyenne est d'environ 850 CDM pour une palpation légère et d'environ 900 CDM pour une palpation plus profonde. Lorsque la couche de silicone agit seule, sans intervention externe, la valeur mesurée descend à 450 CDM. Ces valeurs, soumises aux mêmes calculs que précédemment, fournissent les résultats définitifs.

Le seuil de force par newton (palpation superficielle) :

$$F(\text{seuil}) = 6.86N$$

Calcul le seuil de force par newton (palpation profonde) :

$$F(\text{seuil}) = 7.84N$$

III.3.8 Calibration de capteur de région fosse iliaque droite

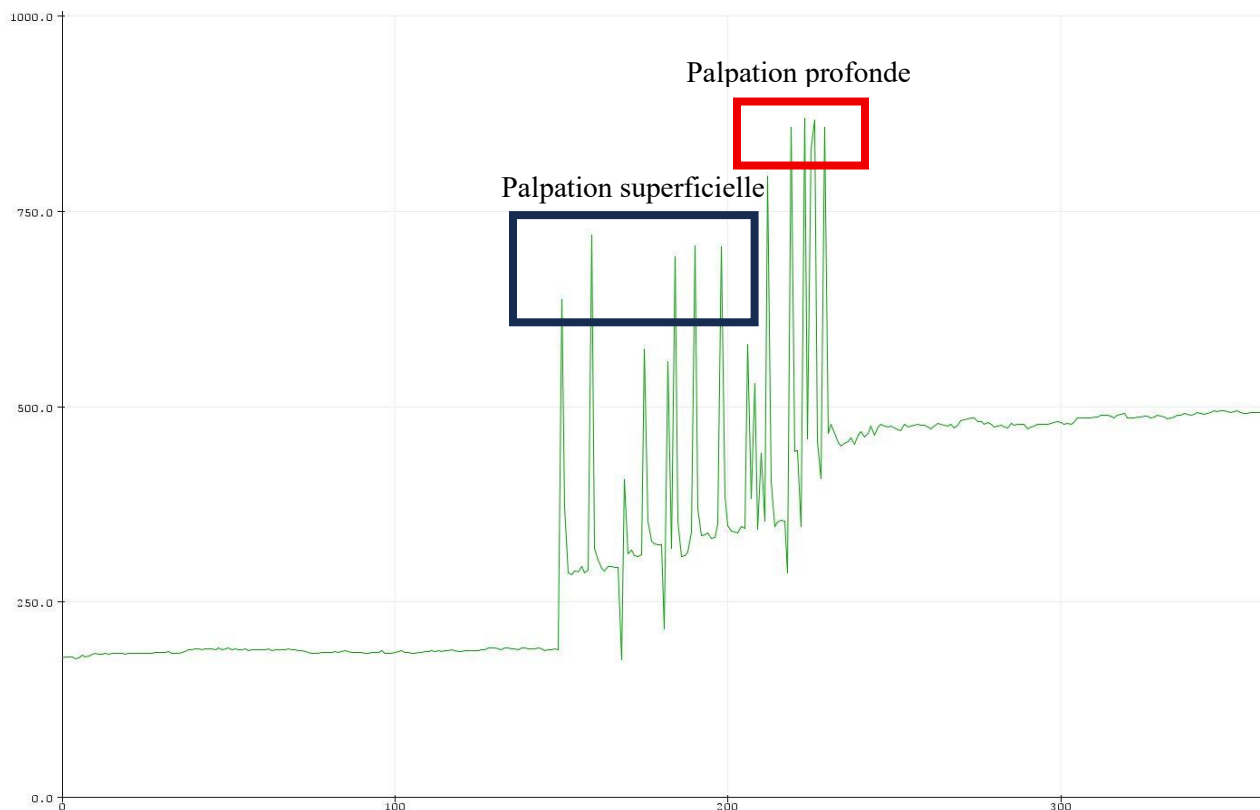


Figure 41 : Mesures enregistrées pour la région de la fosse iliaque droite lors des palpations superficielles et profondes

Les mesures obtenues via le traceur série de l'Arduino, représentées sur la figure 40, indiquent que la **palpation superficielle** correspond à une valeur moyenne proche de **700 CDM** tandis que la **palpation profonde** se situe autour de **800 CDM**. En comparaison, la simple force exercée par le silicone seul produit environ **500 CDM**. L'utilisation des calculs précédemment établis permet de traiter ces données.

Le seuil de force par newton (palpation superficielle) :

$$F(\text{seuil}) = 1.92N$$

Calcul le seuil de force par newton (palpation profonde) :

$$F(\text{seuil}) = 3.92N$$

III.3.9 Calibration de capteur de région fosse iliaque gauche

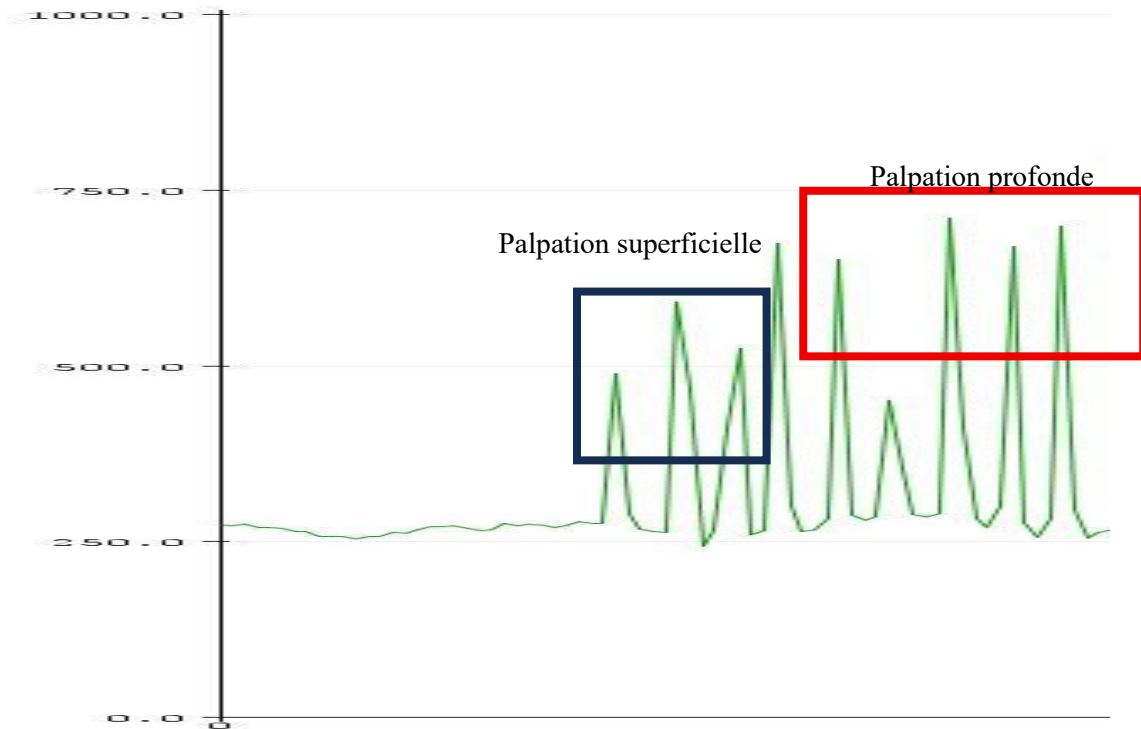


Figure 42 : Mesures enregistrées pour la région de la fosse iliaque gauche lors des palpations superficielles et profondes

D'après la figure 41 issue du traceur série de l'Arduino, la valeur relevée est approximativement de **520** pour une palpation en surface et de **680 CDM** pour une palpation plus appuyée. Sans aucune interaction externe, la seule action de la couche de silicone génère une valeur voisine de **250 CDM**. En appliquant les mêmes calculs que dans l'étape précédente, on obtient les résultats finaux.

Le seuil de force par newton (palpation superficielle) :

$$F(\text{seuil}) = 3.92N$$

Calcul le seuil de force par newton (palpation profonde) :

$$F(\text{seuil}) = 8.33N$$

Les résultats de seuil de palpation superficielle et profonde de toutes les régions sont présentés dans le tableau suivant :

Région	Type de palpation	Seuil (Newton)
Épigastre	Superficielle	0.39
	Profonde	1.96
Hypocondre droite	Superficielle	3.92
	Profonde	6.86
Hypocondre gauche	Superficielle	1.96
	Profonde	4.9
Ombilicale	Superficielle	0.29
	Profonde	0.39
Flanc droite	Superficielle	9
	Profonde	12
Flanc gauche	Superficielle	6.86
	Profonde	9.81
Hypogastre	Superficielle	6.86
	Profonde	7.84
Fosse iliaque droite	Superficielle	1.92
	Profonde	3.92
Fosse iliaque gauche	Superficielle	3.92

	Profonde	8.33
--	----------	------

Tableau 2 : Les résultats de seuil de palpation superficielle et profonde de toutes les régions

III.4 Interface graphique

Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre précédent, l'interface développée pour le prototype est de type **customtkinter**, offrant un design moderne et interactif adapté à la simulation clinique. L'application s'ouvre sur un premier écran de type **PinScreen**, où l'utilisateur est invité à saisir un code PIN pour accéder à la configuration de la maquette. Cet écran comprend un logo, une phrase d'introduction élégante, un champ de saisie pour le code PIN, ainsi que des boutons permettant de valider l'entrée ou de quitter l'application. Si le code PIN saisi est correct, l'utilisateur est dirigé vers l'écran principal, sinon un message d'erreur s'affiche.

Le logo de l'interface occupe une place centrale sur l'écran d'accueil (Annexe 1) et revêt une double signification. Il présente une photo d'un abdomen touché par une main, illustrant directement l'action de palpation réalisée lors de l'examen clinique simulé. En parallèle, le nom de la maquette, TACTUS, qui signifie "le touché" en latin, renforce symboliquement cette dimension tactile. Ainsi, le logo ne se limite pas à un élément graphique décoratif, mais sert à rappeler visuellement l'objectif principal de la maquette : l'apprentissage et la pratique de la palpation abdominale, en mettant l'accent sur l'interaction physique et l'expérience sensorielle de l'utilisateur.



Figure 43 : le logo

L'écran principal (*Annexe 2*) permet la configuration des paramètres de palpation pour la maquette. Il comprend plusieurs éléments interactifs : une liste de cases à cocher pour sélectionner les différentes régions abdominales à simuler, une option permettant de sélectionner toutes les régions simultanément, des boutons radio pour définir le niveau de pression (léger ou profond) et la présence ou l'absence de défense abdominale. Les actions de l'utilisateur sont directement transmises à la maquette via une connexion série avec un microcontrôleur Arduino, assurant la communication en temps réel.

L'interface fournit également des **retours visuels clairs**, grâce à un label de statut qui informe l'utilisateur de l'état de la configuration (prêt, succès, ou erreur). Cette organisation permet à l'utilisateur de configurer de manière intuitive et sécurisée les différents paramètres de simulation, tout en garantissant un contrôle précis sur les régions simulées, le niveau de pression et la détection des signes cliniques tels que la défense abdominale.

Ainsi, l'interface joue un rôle central dans l'interaction entre l'utilisateur et la maquette, combinant ergonomie, feedback visuel et communication directe avec le matériel pour assurer une expérience de simulation réaliste et fiable.

III.5 Assemblage de prototype

Pour l'assemblage du prototype, nous avons adopté une méthode en plusieurs couches afin d'assurer à la fois la protection des composants électroniques et le réalisme de la simulation. La première étape consiste à fixer une couche d'éponge (directement sur la surface du mannequin). Cette base est essentielle, car placer les capteurs et les moteurs directement sur la structure rigide du mannequin pourrait les endommager et réduire leur efficacité. L'éponge sert donc de support souple et amortisseur, créant une zone sécurisée où les composants peuvent être installés sans risque tout en garantissant une certaine flexibilité lors des manipulations.

Une fois cette première couche en place, les capteurs et les moteurs sont installés dessus (figure 36), en fonction des zones du mannequin à simuler. L'ensemble de ces composants est relié à un circuit électronique placé à l'intérieur du mannequin pour le protéger des chocs et de la poussière, tout en maintenant un design propre et compact sans câbles apparents. La batterie, quant à elle, est placée à l'extérieur du mannequin afin de faciliter la recharge et de permettre son remplacement si

nécessaire. Cette disposition rend l'entretien et l'utilisation plus simples, car il est possible de recharger la batterie directement sans démonter le prototype.

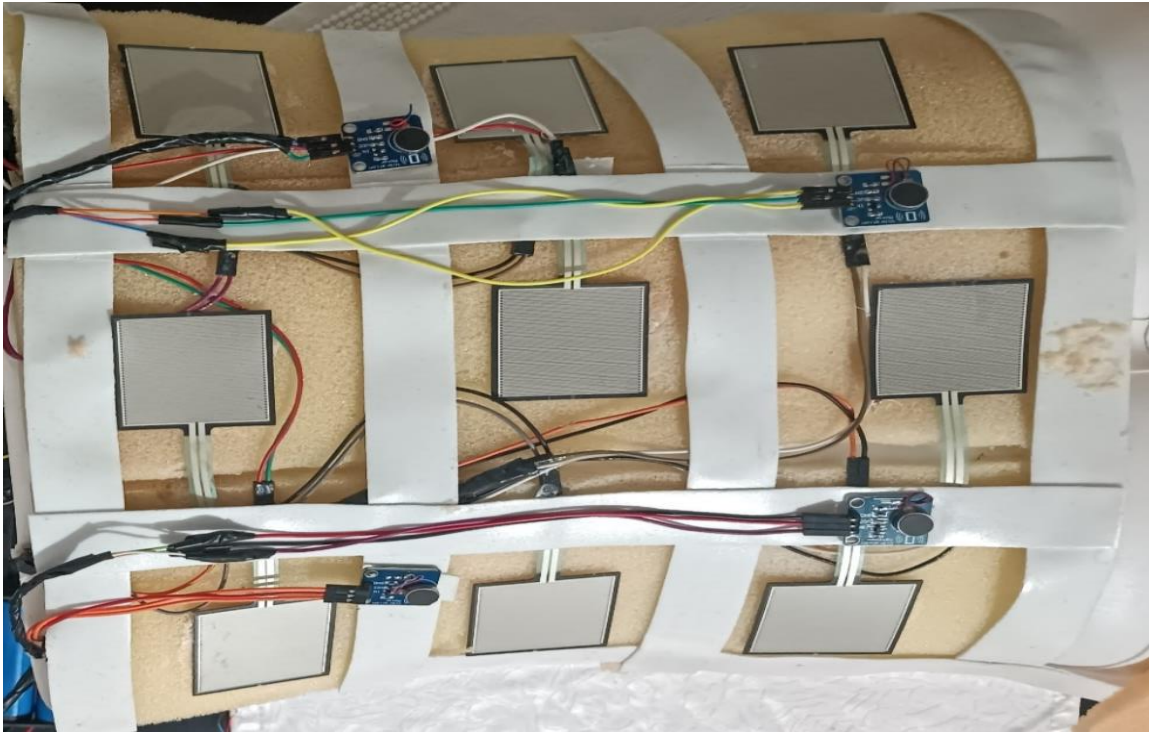


Figure 44 : emplacement de première couche d'éponge et les capteurs et moteurs dans la maquette

La troisième étape consiste à recouvrir les capteurs et les moteurs avec une deuxième couche d'éponge. Cette couche sert à donner une certaine résistance au toucher, comme celle d'un vrai abdomen, et à reproduire la forme et les reliefs du ventre. Elle rend la palpation plus réaliste proche de la sensation que l'on aurait sur un patient.



Figure 45 : application de deuxième couche d'éponge

Des scratches ont été intégrés sur la couche d'éponge afin de fixer solidement des sacs gonflables servant à simuler la contracture musculaire abdominale.



Figure 46 : fixation des sacs gonflable

Enfin, l'ensemble est recouvert d'une couche de silicone qui vient parfaire la structure. Ce revêtement imite l'apparence et la texture de la peau humaine, offrant ainsi un rendu visuel et tactile hautement réaliste. Il protège également les couches inférieures contre l'usure et les salissures, tout en facilitant le nettoyage et l'entretien du modèle. Cette dernière étape donne au prototype un aspect final crédible et prêt à être utilisé dans un contexte pédagogique.

Le prototype final est présenté dans la figure suivante :



Figure 47 : prototype finale

III.6 Fonctionnement de prototype

Le fonctionnement de la maquette se déroule en plusieurs étapes successives pour assurer une simulation réaliste de l'examen clinique abdominal. Tout d'abord, la maquette est placée sur une

table stable afin de garantir la sécurité et la stabilité lors de la manipulation. Ensuite, les **batteries** sont installées pour alimenter les différents composants électroniques intégrés. Le **PC est allumé**, puis le câble reliant l'Arduino à l'ordinateur est connecté afin de **téléverser le code Arduino** nécessaire au contrôle de la maquette.

Une fois la configuration terminée, l'**interface utilisateur** est ouverte pour sélectionner le scénario de palpation, incluant le choix des **régions abdominales**, le **type de palpation** (superficielle ou profonde) et la **présence ou absence de défense abdominale**. L'étudiant peut alors procéder à la **palpation de la maquette**. Selon les paramètres sélectionnés, la maquette réagit de manière interactive : un **son de douleur** est émis et une **LED rouge s'allume** si la zone est douloureuse, tandis que des **vibrations sont générées** pour simuler la défense abdominale. Enfin, la **contracture abdominale** est reproduite manuellement par le gonflage des **sacs pneumatiques intégrés**, ajoutant un élément tactile supplémentaire pour renforcer le réalisme de l'expérience.



Figure 48 : maquette fixée sur une table



Figure 49 : placement des batteries

A screenshot of the Arduino IDE interface showing a code editor with C++ code for an Arduino Mega. The code includes initialization of variables, a loop function for reading sensor data, and a function to control LEDs based on sensor readings. The IDE window title is 'fcr | Arduino 1.8.19' and the menu bar includes 'Fichier', 'Édition', 'Croquis', 'Outils', and 'Aide'. The toolbar shows icons for file operations and a 'Téléverser' button. The code is as follows:

```
fcr | Arduino 1.8.19
Fichier Édition Croquis Outils Aide
Téléverser

fcr
  capteurs_actifs[i] = false;
  seuil_actif[i] = 1024; // Inactif par défaut
}

digitalWrite(ledRouge, LOW);
digitalWrite(ledVerte, HIGH); // LED verte allumée par défaut

Serial.println(" Arduino MEGA prêt.");
}

void loop() {
  if (Serial.available()) {
    input = Serial.readStringUntil('\n');
    input.trim();
    parseCommande(input);
  }

  bool douleur_detectee = false;
  unsigned long maintenant = millis();

  for (int i = 0; i < NB_CAPTEURS; i++) {
    if (capteurs_actifs[i]) {
      int pression = analogRead(fsrFins[i]);
      if (pression > seuil_actif[i]) {
        douleur_detectee = true;
        break;
      }
    }
  }

  if (douleur_detectee && (maintenant - dernier_buzz > delai_buzz)) {
    digitalWrite(ledRouge, HIGH);
    digitalWrite(ledVerte, LOW);
  }

  if (dfplayerOk) {
```

Figure 50 : téléversement de code avec Arduino IDE

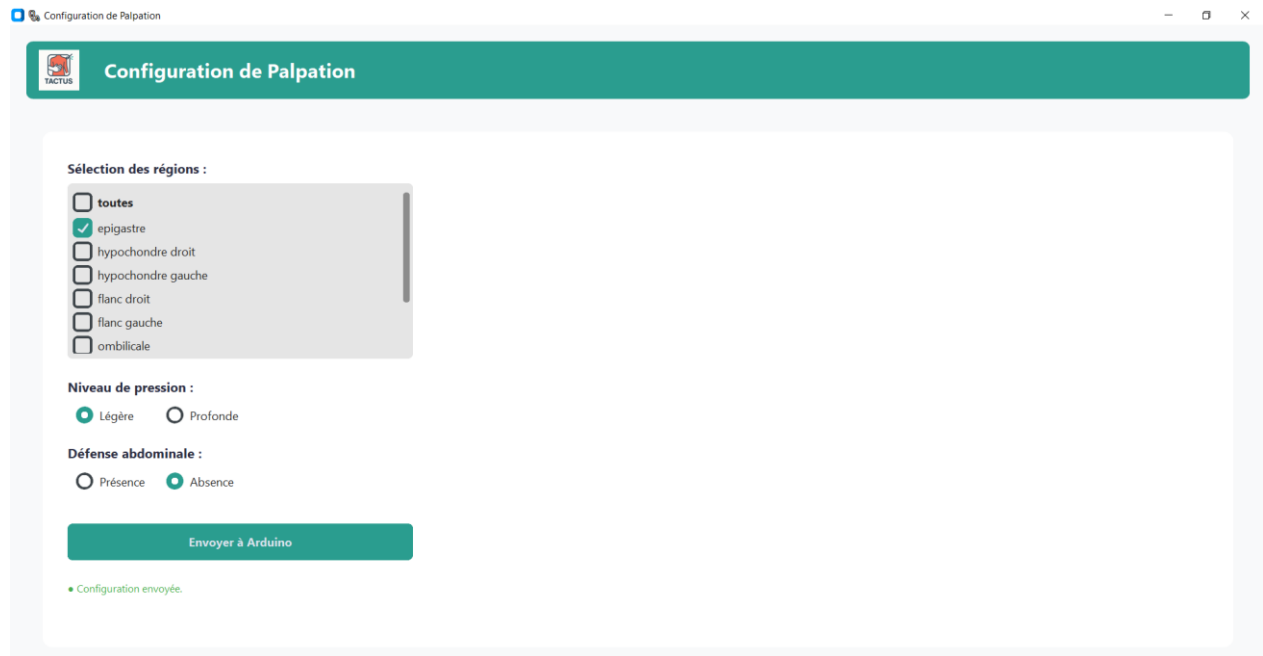


Figure 51 : sélection des scénarios

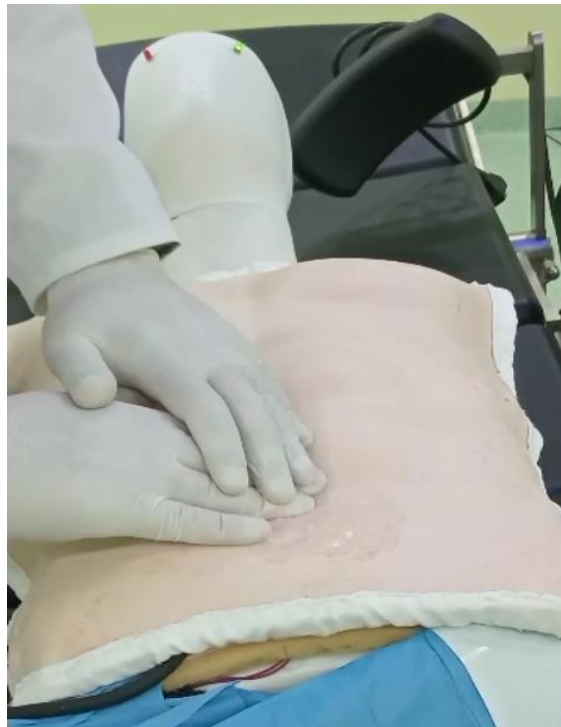


Figure 52 : palpation de l'étudiant

III.7 Tests et validation

Afin de valider le fonctionnement et le réalisme du prototype, une séance de test a été organisée avec un groupe de 11 étudiants en médecine choisi au hasard, composé de 6 étudiants de 3ème année et de 5 étudiants de 4ème année. Ces années ont été spécifiquement choisies car elles correspondent aux phases-clés de l'apprentissage des compétences pratiques en examen clinique abdominal. Les étudiants de ces niveaux sont en train de développer et de consolider leurs capacités d'évaluation abdominale, ce qui rend leur retour particulièrement pertinent pour évaluer la fiabilité et le réalisme de la maquette.

Le test avait pour objectif principal de vérifier le fonctionnement du système et de recueillir des retours sur différents aspects liés à l'expérience de palpation. L'évaluation a été réalisée le 06 octobre 2025 au sein de l'hôpital universitaire de Tlemcen service urgences médicales, dans un cadre adapté à la simulation clinique et à l'apprentissage pratique

Lors de cette séance, les étudiants ont été invités à interagir avec la maquette en réalisant plusieurs scénarios de palpation représentant différentes situations cliniques qui vont examiner leur capacité à reconnaître les douleurs des différentes régions d'abdomen, la défense et la contracture.

À l'issue de l'exercice, les étudiants ont été invités à répondre au questionnaire de satisfaction (*Annexe 3*) son objectif principal était de recueillir leurs impressions et leur niveau de satisfaction concernant différents aspects de la maquette, tels que le réalisme tactile (texture de la peau, fermeté des tissus), la précision des régions anatomiques, la réponse de la maquette à la palpation (défense, contracture, douleur), la variété des scénarios cliniques simulés et le rôle pédagogique de la maquette dans l'apprentissage de l'examen abdominal. Ce questionnaire permet ainsi de mesurer la perception subjective des étudiants et leur expérience utilisateur globale. Parallèlement, une grille d'observation (*Annexe 4*) a été remplie par les concepteurs pour évaluer de manière objective la performance de la maquette. Elle vise à vérifier si la maquette permet d'identifier correctement les signes cliniques clés, tels que les neuf régions de l'abdomen, la localisation précise du siège de la douleur, la reconnaissance des zones de défense et l'identification des contractures abdominales. Contrairement au questionnaire de satisfaction, cette évaluation ne repose pas sur le ressenti des étudiants mais sur une observation systématique de l'efficacité pratique et fonctionnelle de la maquette.

III.7.1 Les scénarios des tests :

Scénario 1 :

- Région : Hypochondre droit
- Type de palpation : Superficielle
- Présence de défense : Oui

Scénario 2 :

- Région : Épigastre
- Type de palpation : Profonde
- Présence de défense : Non

Scénario 3 :

- Région : Fosse iliaque gauche
- Type de palpation : Superficielle
- Présence de défense : Oui

Scénario 4 :

- Région : Flanc droit
- Type de palpation : Profonde
- Présence de défense : Non

Scénario 5 (global) :

- Région : Abdomen entier
- Type de palpation : Superficielle et profonde
- Contracture : Oui

III.7.2 Résultat :

Les résultats de l'évaluation ont été regroupés et synthétisés sous forme des tableaux afin de faciliter leur lecture et leur analyse. Ces tableaux présentent de manière claire les réponses recueillies auprès des étudiants, offrant ainsi une vision globale de la performance et de la pertinence du prototype dans un contexte pédagogique.

Critères évalués	Satisfait (n/11)	Moyennement satisfait (n/11)	Non satisfait (n/11)

Réalisme tactile (peau, tissus)	11	0	0
Précision des régions anatomiques abdominales	10	1	0
Réponse à la palpation – Douleur	10	1	0
Réponse à la palpation – Défense	8	3	0
Réponse à la palpation – Contracture	9	2	0
Variété des scénarios cliniques	11	0	0
Rôle de la maquette dans l'apprentissage	11	0	0

Tableau 3 : Résultats du questionnaire de satisfaction

Critères observés	Oui (n/11)	Non (n/11)
Identification correcte des 9 régions abdominales	10	1
Localisation précise du siège de la douleur	9	2
Identification du siège de la défense abdominale	8	3
Reconnaissance de la contracture abdominale	11	0

Tableau 4 : Résultats de la grille d'observation

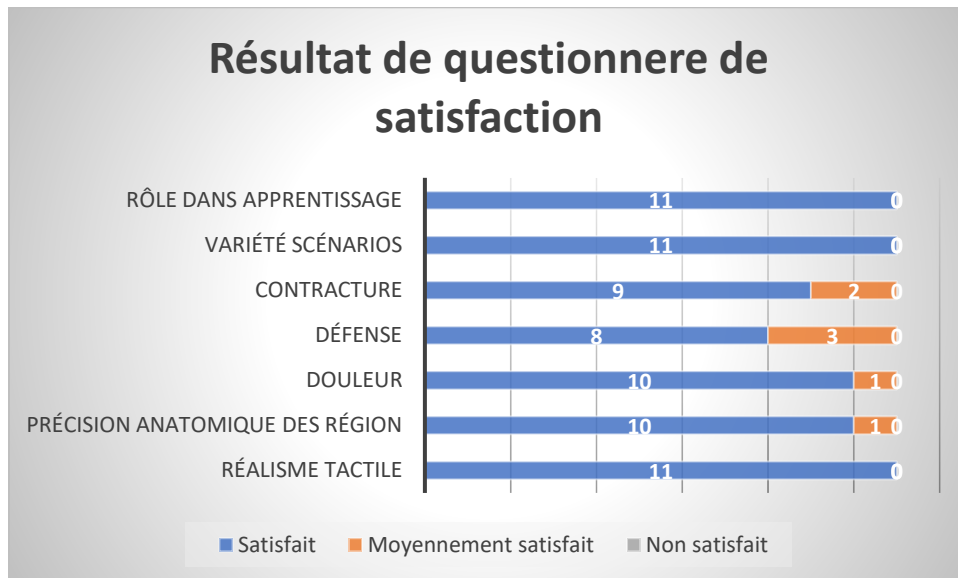


Figure 53 : tracé graphique des résultats de questionnaire de satisfaction

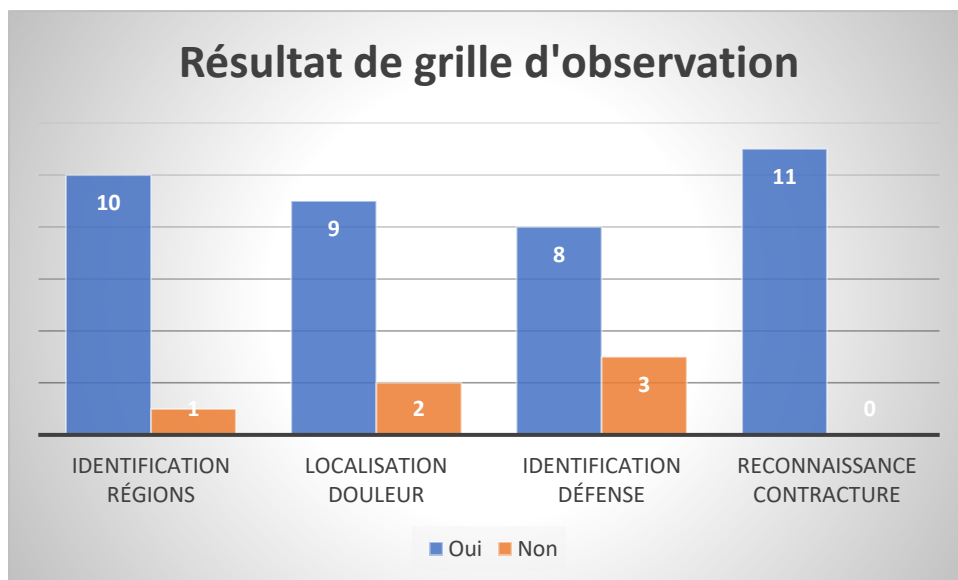


Figure 54 : tracé graphique des résultats de grille d'observation

L'évaluation de la maquette de simulation d'examen clinique d'un abdomen douloureux a été réalisée à l'aide de deux outils principaux : un questionnaire de satisfaction destiné aux utilisateurs et une grille d'observation permettant d'évaluer le fonctionnement et la pertinence pédagogique du dispositif. Ces deux approches ont permis d'obtenir une vision globale, à la fois objective et

subjective, du rendement de la maquette. Les résultats obtenus sont dans l'ensemble très positifs et confirment la bonne conception du prototype.

En ce qui concerne la **grille d'observation**, les performances de la maquette ont été jugées satisfaisantes dans presque tous les critères. L'**identification des régions abdominales** a été réussie par 10 utilisateurs sur 11, ce qui montre que la représentation anatomique est claire et que la délimitation des zones est bien respectée. Cela indique que le modèle permet aux apprenants de repérer facilement les différentes régions de l'abdomen et d'effectuer un examen ciblé selon la localisation des douleurs.

La **localisation de la douleur** a également donné de bons résultats, avec 9 utilisateurs sur 11 qui ont pu identifier correctement les zones douloureuses. Cela signifie que la maquette restitue de manière convaincante la douleur dans les régions concernées, permettant aux étudiants de faire le lien entre le geste de palpation et la réaction simulée. Ce point est très important sur le plan pédagogique, car il permet d'entraîner les étudiants à interpréter les signes cliniques avec justesse.

En revanche, le critère lié à la **détection de la défense abdominale** a obtenu un score légèrement plus faible, avec 8 "oui" et 3 "non". Même si la majorité des utilisateurs ont pu reconnaître ce signe, certains ont eu du mal à percevoir la tension musculaire attendue. Ce résultat montre que la simulation de la défense reste à améliorer, peut-être en ajustant le niveau de résistance ou la sensibilité du mécanisme de réaction.

La **contracture abdominale**, en revanche, a été parfaitement reconnue par tous les utilisateurs (11/11). Ce résultat met en avant la fiabilité du système de contraction et confirme que la maquette reproduit bien les signes caractéristiques d'une irritation péritonéale simulée.

Concernant le **questionnaire de satisfaction**, les résultats sont également très encourageants. Le **réalisme tactile** de la peau et des tissus a été jugé entièrement satisfaisant par l'ensemble des participants. Ce critère est essentiel, car il contribue directement à l'immersion de l'utilisateur et à la crédibilité de la simulation. La **précision des régions anatomiques** a aussi été largement approuvée (10 satisfaits sur 11), ce qui montre que le travail de modélisation anatomique est bien réalisé.

Les réponses à la palpation ont obtenu des résultats positifs : la **douleur** et la **contracture** ont été jugées satisfaisantes par la grande majorité des utilisateurs, tandis que la **défense** a reçu quelques observations moyennes, confirmant les remarques faites lors de l'observation directe. Enfin, les deux derniers critères, la **variété des scénarios cliniques** et le **rôle pédagogique de la maquette**, ont obtenu la satisfaction totale de tous les participants. Cela prouve que la maquette n'est pas seulement fonctionnelle, mais aussi utile et pertinente pour l'enseignement clinique.

En résumé, les résultats montrent que la maquette offre une expérience d'apprentissage riche et réaliste. Elle permet aux utilisateurs de se familiariser avec les gestes de palpation abdominale et de reconnaître les signes principaux de douleur, de défense et de contracture. Malgré quelques limites techniques, les résultats globaux confirment la qualité de conception du dispositif et son efficacité dans le cadre de la formation médicale pratique.

III.8 Discussion critique et perspectives

III.8.1 Discussion

Notre projet s'inscrit dans le cadre de la conception et de la réalisation d'une maquette interactive à vocation pédagogique, destinée à la simulation médicale. Ce travail, mené sur une durée de huit mois, avait pour objectif principal de développer un dispositif permettant de reproduire les principaux signes cliniques d'un abdomen douloureux, afin de faciliter l'apprentissage pratique des gestes d'examen. L'approche adoptée combine des aspects électroniques, mécaniques et pédagogiques pour offrir une expérience de simulation réaliste et accessible. La maquette obtenue vise ainsi à répondre aux besoins des étudiants en médecine et des centres de formation, tout en proposant une alternative locale et économique aux simulateurs commerciaux souvent coûteux et importés.

Les résultats de l'évaluation montrent que la maquette de simulation d'examen clinique d'un abdomen douloureux remplit globalement bien ses objectifs pédagogiques et techniques. Cependant, une analyse critique plus approfondie permet de mieux comprendre les forces, les limites et les perspectives d'amélioration du dispositif, notamment en tenant compte du choix technique d'utiliser des moteurs vibrants pour simuler la défense abdominale.

Sur le plan **pédagogique**, la maquette s'est révélée efficace et utile pour la formation pratique. Les utilisateurs ont apprécié la clarté des repères anatomiques, la variété des scénarios cliniques et la réponse réaliste de la maquette lors des manipulations. Le taux élevé de satisfaction concernant le réalisme tactile et la précision anatomique prouve que le dispositif favorise une bonne immersion dans la situation simulée. La maquette a donc permis aux étudiants de s'entraîner à reconnaître les principaux signes abdominaux (douleur, défense, contracture) dans un environnement sécurisé et reproductible. Cette approche favorise un apprentissage actif et concret, où l'étudiant peut répéter les gestes et améliorer sa technique sans risque pour un patient réel.

Sur le plan **technique**, la simulation de la défense abdominale par **moteurs vibrants** constitue une solution ingénieuse et accessible. Ce choix permet de reproduire une sensation de tension ou de réaction musculaire sans recourir à des mécanismes complexes. Cependant, les résultats du questionnaire et de la grille d'observation ont montré que certains utilisateurs n'ont pas perçu cette défense de manière suffisamment claire ou naturelle. Cela s'explique par le fait que la vibration, bien qu'elle évoque une réaction au toucher, ne reproduit pas exactement la **rigidité progressive des muscles abdominaux** que l'on observe chez un patient réel. La vibration crée une stimulation sensorielle plutôt superficielle, tandis que la véritable défense abdominale se manifeste par une résistance profonde et continue.

Pour améliorer ce point, plusieurs pistes peuvent être envisagées. Il serait possible, par exemple, de **combinaison des moteurs vibrants avec un mécanisme de tension mécanique**, capable d'augmenter la rigidité de la surface selon le niveau de pression exercé. Une autre solution serait d'ajuster la fréquence et l'intensité des vibrations pour mieux imiter la réponse musculaire. Malgré cette limite, l'utilisation de moteurs vibrants reste un **choix pertinent** pour un prototype local à faible coût, car elle permet d'obtenir un effet perceptible et de représenter symboliquement la défense sans complexifier le système.

Sur le plan **méthodologique**, il faut rappeler que l'évaluation a été menée auprès d'un échantillon restreint de 11 utilisateurs. Même si les résultats sont encourageants, ils ne peuvent pas être généralisés à un grand nombre d'apprenants. De plus, les critères d'évaluation reposent principalement sur la perception subjective des utilisateurs, ce qui peut varier selon leur expérience clinique ou leur sensibilité tactile. Pour les études futures, il serait intéressant d'élargir l'échantillon et d'ajouter des mesures plus objectives, comme la force exercée lors de la palpation ou la réaction

enregistrée par les capteurs. Ces données permettraient de mieux quantifier la performance de la maquette et d'appuyer les résultats par des preuves mesurables.

D'un point de vue **global**, la maquette présente de nombreux avantages. Elle est **simple à utiliser, peu coûteuse, fabriquée localement** et adaptée aux besoins de la formation médicale dans les contextes à ressources limitées. Sa connexion à une interface PC la rend interactive et évolutive, offrant la possibilité de varier les scénarios cliniques selon les besoins pédagogiques. L'ensemble de ces caractéristiques en fait un outil prometteur pour les facultés de médecine, les centres de simulation et la formation continue des professionnels de santé.

En conclusion, cette discussion met en évidence que la maquette atteint un bon équilibre entre réalisme, simplicité et utilité pédagogique. Le choix des moteurs vibrants pour simuler la défense abdominale constitue une solution innovante, bien qu'imparfaite sur le plan physiologique. Avec des ajustements techniques visant à rendre la réaction plus progressive et naturelle, la maquette pourrait offrir une expérience encore plus réaliste. Elle représente ainsi une **étape importante vers la conception d'outils de simulation accessibles, efficaces et adaptés à la formation clinique moderne.**

III.8.2 Comparaison avec l'état de l'art

Les tests de satisfaction et d'observation réalisés sur notre maquette, bien qu'ils aient permis d'évaluer son efficacité pédagogique et son réalisme perçu, ne suffisent pas à eux seuls pour apprécier pleinement sa valeur technologique et son positionnement parmi les solutions existantes. En effet, pour juger de la pertinence de notre conception, il est essentiel de la comparer à des modèles similaires développés à l'échelle internationale. Dans cette optique, nous avons identifié deux brevets représentatifs de l'état de l'art dans le domaine des simulateurs d'abdomen : le brevet international **WO2014145013A1**, qui décrit un simulateur à haut réalisme intégrant des éléments haptiques et des actionneurs, et le brevet chinois **CN112652206A**, orienté vers la simplicité, la flexibilité et l'accessibilité pédagogique. Cette comparaison permet de situer notre maquette par rapport à ces références, d'en dégager les points forts et les limites, et de proposer des perspectives d'amélioration adaptées à notre contexte local.

La comparaison entre la maquette de simulation d'examen clinique d'un abdomen douloureux et les deux brevets étudiés (WO2014145013A1 et CN112652206A) permet de situer clairement la

position de notre prototype dans le paysage actuel des dispositifs de simulation médicale. Cette analyse met en évidence les points de convergence technologique, les différences fonctionnelles et les apports spécifiques de notre conception.

Le brevet **WO2014145013A1** représente un simulateur hautement sophistiqué, conçu pour la formation avancée en milieu médical. Il intègre plusieurs couches de matériaux imitant la peau, les muscles et les organes internes, et utilise des moteurs ou vérins pour reproduire la contracture ou la défense abdominale. L'ensemble est piloté par un logiciel complexe capable de gérer différents scénarios cliniques et de mesurer la force, la durée et la localisation des gestes effectués par l'apprenant. Ce système se distingue donc par son réalisme tactile et sa précision, mais il présente également des limites notables : un coût de fabrication élevé, une maintenance complexe et une usure rapide des matériaux comme le silicone.

À l'inverse, le brevet **CN112652206A** propose une approche plus simple et économique. Le dispositif repose principalement sur une structure en mousse et en silicone, associée à des capteurs de pression basiques. Le retour d'information se fait par LED ou par signal sonore, permettant à l'étudiant d'évaluer la justesse de ses gestes. Bien que moins réaliste que le brevet international, cette solution a l'avantage d'être accessible, modulable et adaptée à une utilisation pédagogique de base. Cependant, elle ne permet pas de reproduire la contracture ou la défense de manière dynamique, car les réactions simulées sont statiques et préprogrammées.

Notre maquette se positionne entre ces deux approches, combinant **simplicité de conception, interactivité et pilotage informatique**. Contrairement au dispositif chinois, elle ne se limite pas à un retour visuel ou sonore : la simulation de la défense abdominale est assurée par des **moteurs vibrants**, offrant une réaction dynamique au toucher. Ces vibrations reproduisent de manière réaliste la résistance musculaire observée lors d'une palpation sur un patient souffrant. De plus, la maquette est **commandée par un ordinateur** via une interface logicielle permettant de sélectionner les zones douloureuses, d'ajuster l'intensité de la réaction et de créer différents scénarios d'apprentissage. Cet aspect interactif rapproche notre prototype du brevet WO2014145013A1, tout en maintenant une **architecture matérielle plus simple et un coût réduit**, ce qui facilite sa reproduction et son utilisation dans les centres de formation locaux.

Sur le plan pédagogique, notre dispositif permet un apprentissage progressif : l'étudiant peut explorer différentes zones de l'abdomen, tester ses gestes et observer la réponse du simulateur. Cette approche favorise la compréhension des signes cliniques tels que la douleur localisée, la défense et la rigidité abdominale. Contrairement au brevet WO2014145013A1, qui s'adresse à des utilisateurs expérimentés, notre maquette vise principalement les étudiants en formation initiale, en leur offrant un outil accessible mais suffisamment réaliste pour renforcer leur compétence tactile.

Cependant, certaines limites subsistent. Le réalisme tactile reste inférieur à celui du brevet international, notamment en raison de l'absence de capteurs multipoints et de la difficulté à reproduire les textures internes avec une précision chirurgicale. De plus, le système de vibration, bien qu'efficace pour simuler la défense, ne reproduit pas totalement la contracture diffuse observée en clinique réelle. Enfin, la collecte et l'analyse des données de palpation sont encore limitées par rapport aux systèmes de mesure sophistiqués décrits dans les brevets de haute technologie.

En conclusion, notre maquette constitue une **solution intermédiaire et équilibrée** entre le réalisme complexe du brevet WO2014145013A1 et la simplicité économique du brevet CN112652206A. Elle se distingue par son **interactivité dynamique, son pilotage logiciel et sa conception locale à faible coût**, répondant ainsi aux besoins spécifiques des établissements de formation biomédicale. Cette approche démontre qu'il est possible de concilier accessibilité, pédagogie et innovation technologique dans la conception de simulateurs médicaux destinés à la formation clinique.

Critère	WO2014145013A1	CN112652206A	Notre maquette
Réalisme tactile	Très élevé (moteurs + couches multiples simulant les tissus)	Bon (silicone + inserts interchangeables)	Bon (silicone + couches simples)
Simulation dynamique	Oui, modulable selon le scénario	Oui, mais statique et préconfigurée	Oui, dynamique par moteurs vibrants, son

			et routeur LED contrôlés par PC
Capteurs & mesure	Multipoints, très précis	Capteurs de pression simples	Capteurs de zones commandés via interface, sans mesure de force
Interface pédagogique	Scénarios avancés, suivi détaillé des gestes	Interface simple avec retour LED/sonore	Interface logicielle sur PC : choix de zone douloureuse et intensité et variété des scénarios clinique
Fabrication	Très complexe (mécanique et électronique avancées)	Moyenne à faible (structure simple)	Simple et locale (structure légère et matériaux disponibles)
Coût	Très élevé	Faible à moyen	Faible (composants accessibles et production locale)
Maintenance	Nécessite un spécialiste	Simple et rapide	Facile, modules facilement remplaçables
Portabilité	Faible (appareil lourd et encombrant)	Bonne	Très bonne (léger, compact, facile à transporter)

Tableau 5 : comparaison avec l'état de l'art

III.9 Récapitulation

La réalisation du prototype de la maquette de simulation d'examen clinique d'un abdomen douloureux a constitué une étape essentielle de ce travail. Elle a permis de transformer les idées conceptuelles en un dispositif fonctionnel capable de reproduire différents signes cliniques abdominaux, tels que la douleur, la défense et la contracture.

Le processus de conception a débuté par la **modélisation mécanique de la structure**. Le choix des matériaux a été guidé par la recherche d'un compromis entre **réalisme tactile, légèreté et accessibilité locale**. La maquette se compose d'une base rigide assurant la stabilité, d'une **couche d'éponge recouverte de silicone** pour simuler la peau et les tissus mous, et de **modules internes** reproduisant les réactions abdominales. Pour la défense musculaire, des **moteurs vibrants** ont été intégrés, offrant une réaction dynamique perceptible au toucher. Quant à la **contracture musculaire**, elle a été simulée à l'aide de **sacs gonflables fixés sur la couche d'éponge par des scratches**, permettant de reproduire la rigidité abdominale et de modifier facilement la configuration selon le scénario clinique.

Sur le plan électronique, le système repose sur une **interface de commande pilotée par ordinateur**, qui permet de sélectionner les zones douloureuses, de régler l'intensité des vibrations ou de l'inflation, et de gérer les scénarios de simulation. Cette interface assure une **interaction directe entre l'utilisateur et la maquette**, favorisant une immersion pédagogique réaliste. L'ensemble est alimenté et contrôlé par une carte microcontrôleur reliée au PC, garantissant un fonctionnement fiable et adaptable.

Enfin, la **phase de tests et d'évaluation** a permis de valider les performances du prototype. Les utilisateurs ont jugé la maquette **réaliste, interactive et utile pour l'apprentissage pratique**. Certains ajustements restent possibles, mais les résultats obtenus confirment la pertinence des choix techniques et pédagogiques.

En résumé, la réalisation du prototype a démontré qu'il est possible de concevoir **un simulateur médical local, simple, abordable et fonctionnel**, capable de reproduire les principaux signes d'un abdomen douloureux. Cette maquette constitue une base solide pour le développement futur d'outils de simulation médicale adaptés aux besoins de formation dans les établissements médicaux.



Business Model Canvas

IV.Chapitre 04 : Business Model Canvas

IV.1 Introduction

Le **Business Model Canvas (BMC)** est un outil de gestion stratégique utilisé pour développer de nouveaux modèles économiques ou analyser des modèles existants. Il se présente sous la forme d'un canevas visuel qui décrit les principaux éléments d'une entreprise ou d'un produit, tels que la **proposition de valeur**, l'**infrastructure**, les **clients** et les **aspects financiers**. Cet outil permet aux organisations d'aligner leurs activités en mettant en évidence les choix stratégiques et les compromis possibles.

Le concept des neuf blocs constitutifs du BMC a été proposé pour la première fois en **2005 par Alexander Osterwalder**, dans le cadre de ses travaux de doctorat dirigés par **Yves Pigneur** sur l'ontologie des modèles d'affaires. À partir de 2008, Osterwalder et ses collaborateurs ont développé des outils complémentaires, tels que le **Value Proposition Canvas** et le **Culture Map**, tandis que de nouvelles variantes du canevas ont vu le jour pour répondre à des besoins spécifiques et à différents secteurs d'activité. [24]

Dans notre projet, nous allons réaliser un **Business Model Canvas (BMC)** pour mieux organiser et comprendre le fonctionnement de notre maquette de simulation de l'examen clinique d'un abdomen douloureux. Cet outil nous aidera à définir les besoins, les ressources, les partenaires et les aspects financiers liés au projet. Nous allons présenter et expliquer chacun des **neuf blocs** du BMC afin d'avoir une vision claire et complète qui facilitera la planification et l'évolution du projet.

IV.2 Les blocs de BMC

IV.2.1 Proposition de valeur

Le projet intitulé « **Conception d'une maquette de simulation d'examen clinique d'un abdomen douloureux** » vise à répondre à des besoins critiques dans la formation médicale. Il cible deux segments principaux de clients.

a. Quels problèmes résolvons-nous pour nos clients ?

La formation à l'examen clinique, en particulier pour l'abdomen douloureux, rencontre plusieurs obstacles. Les centres de simulation médicale manquent souvent d'outils adaptés et réalistes. Les maquettes importées sont très coûteuses, ce qui limite leur accessibilité, surtout dans les établissements à budget restreint. De plus, l'entraînement sur de vrais patients pose un risque pour la sécurité, et ne permet pas toujours d'explorer tous les cas cliniques possibles, notamment les plus rares ou complexes. Enfin, il est difficile d'assurer une formation interactive, structurée et répétitive dans ces conditions.

b. Quels besoins de nos clients satisfont nos produits ou services ?

Notre maquette répond au besoin essentiel de pratiquer l'examen clinique de façon sûre et efficace. Elle permet aux étudiants et professionnels de s'exercer librement, sans risque pour les patients, dans un environnement réaliste. Elle offre des scénarios variés qui reproduisent différentes douleurs abdominales, favorisant ainsi un apprentissage progressif et concret. Grâce à son interactivité et sa simplicité d'utilisation, elle répond également au besoin d'un outil pédagogique accessible, mesurable et réutilisable.

c. En quoi notre offre est-elle différente de celle de nos concurrents ?

Contrairement aux simulateurs classiques importés, notre maquette est conçue localement, ce qui permet de réduire fortement les coûts de fabrication et d'adaptation. Elle se distingue aussi par son focus spécifique sur l'examen abdominal douloureux, une situation souvent négligée dans les autres simulateurs plus généralistes. Sa conception combine des capteurs de pression, des retours lumineux et sonores, ainsi qu'une interface simple à utiliser, pour offrir une expérience de simulation réaliste, interactive et complète. Sa taille compacte et son caractère modulable la rendent facilement intégrable dans différents environnements pédagogiques.

d. Quelle est notre proposition unique de valeur ?

Nous proposons une maquette de simulation médicale réaliste, interactive et abordable, conçue localement pour faciliter l'apprentissage pratique de l'examen clinique d'un abdomen douloureux. Elle permet une formation sûre, répétitive et variée, tout en réduisant significativement les coûts

d'équipement pour les centres de simulation. Ce positionnement unique allie qualité pédagogique, accessibilité financière et adaptation aux besoins locaux.

IV.2.2 Segments de clients

a. Quels sont nos clients principaux ?

Nos clients principaux sont les centres de simulation médicale intégrés aux facultés de médecine. Ces structures ont pour mission de former les étudiants en médecine dans des conditions proches de la réalité clinique, mais elles rencontrent souvent des limites budgétaires et techniques pour acquérir du matériel pédagogique spécialisé.

b. Quels sont les différents segments de clients que nous visons ?

En plus des centres de simulation médicale, nous visons deux autres segments importants. Le premier est composé des étudiants en médecine, en particulier ceux en phase clinique, qui souhaitent s'entraîner à poser un diagnostic par la palpation. Le second segment est constitué des centres de formation continue qui assurent la mise à jour des compétences des professionnels de santé déjà en exercice.

c. Quels sont les besoins spécifiques de chaque segment de clients ?

Les centres de simulation ont besoin d'outils pédagogiques interactifs, réalistes, accessibles et faciles à intégrer dans leurs programmes. Les étudiants, quant à eux, cherchent un moyen de s'entraîner librement, sans risquer de commettre des erreurs sur un patient réel, tout en ayant accès à des situations variées. Les professionnels en formation continue ont besoin d'un simulateur compact, modulable et efficace, qui leur permette de se perfectionner rapidement sans mobiliser trop de ressources.

d. Comment pouvons-nous catégoriser nos clients en groupes distincts ?

Nous pouvons classer nos clients en trois groupes distincts : les institutions académiques (centres de simulation médicale), les apprenants (étudiants en médecine), et les structures de formation professionnelle (centres de formation continue). Cette catégorisation nous permet d'adapter notre

approche et notre offre en fonction des besoins, des ressources et des usages spécifiques à chaque groupe.

IV.2.3 Relation avec les clients

a. Quel type de relation chaque segment de clients attend-il de nous ?

Nos clients attendent que nous soyons disponibles, à l'écoute, et prêts à les accompagner à chaque étape. Ils veulent une aide claire, simple et réactive lorsqu'ils rencontrent une difficulté ou ont une question. Les clients qui utilisent notre maquette régulièrement attendent aussi un suivi plus personnalisé, avec quelqu'un qui comprend bien leurs besoins. D'autres préfèrent avoir accès à des informations pratiques, à tout moment, sans devoir nous contacter.

b. Comment entretenons-nous actuellement les relations avec nos clients ?

Nous accordons beaucoup d'importance à la manière dont nous accompagnons nos clients. Pour cela, nous proposons une aide directe à tous ceux qui utilisent notre maquette. Nous répondons à leurs questions, les guidons dans l'utilisation du produit, et leur apportons un soutien adapté si nécessaire. Pour les clients fidèles ou ceux qui travaillent régulièrement avec nous, une personne dédiée de notre équipe les suit de façon continue et leur donne des conseils personnalisés. Nous avons aussi créé un espace en ligne disponible à tout moment, avec une foire aux questions (FAQ) claire et utile.

c. Comment pouvons-nous améliorer ou personnaliser nos interactions avec nos clients ?

Nous pouvons aller plus loin en ajoutant des vidéos courtes qui expliquent comment bien utiliser la maquette ou résoudre un problème courant. Nous pourrions aussi créer un espace client personnel, avec les documents, les mises à jour et un suivi des échanges. Enfin, en prenant le temps de recueillir les avis des utilisateurs, nous pourrions adapter notre accompagnement à leurs attentes et proposer un service encore plus proche de leurs besoins.

IV.2.4 Canaux de distribution

a. Par quels canaux nos clients veulent-ils être atteints ?

Nos clients aiment qu'on communique avec eux de manière simple et directe. Les centres de simulation et les facultés de médecine préfèrent souvent les échanges par email, par téléphone ou lors de rendez-vous sur place. C'est plus concret et ça leur permet de poser leurs questions tranquillement. De leur côté, les étudiants sont plus à l'aise avec les réseaux sociaux, les vidéos explicatives ou les publications dans leurs groupes en ligne. Beaucoup de clients apprécient aussi pouvoir trouver toutes les infos dont ils ont besoin sur un site clair et facile à utiliser.

b. Quels canaux sont les plus efficaces pour atteindre chaque segment de clients ?

Pour les centres et les institutions, ce qui fonctionne le mieux, ce sont les échanges directs : un appel, un email personnalisé, ou une démonstration sur place. Ils aiment aussi nous rencontrer lors de salons ou de journées pédagogiques. Pour les étudiants, les réseaux sociaux, les vidéos claires et les témoignages sont très efficaces, car c'est là qu'ils passent le plus de temps. Les centres de formation continue réagissent bien quand on leur envoie une présentation simple ou quand on propose un rendez-vous pour leur expliquer en personne.

c. Comment pouvons-nous intégrer différents canaux pour améliorer l'expérience clients ?

Nous utilisons plusieurs moyens ensemble pour rendre l'expérience la plus simple et agréable possible. D'abord, on fait connaître la maquette en participant à des événements, en échangeant directement avec les centres et en publiant sur les réseaux sociaux. Ensuite, pour que les clients puissent bien l'évaluer, on propose des démonstrations, des vidéos claires, des essais gratuits, et des notices faciles à suivre. Pour l'achat, ils peuvent passer par notre site, nous appeler, ou nous rencontrer sur place. On propose aussi des facilités de paiement. La livraison est adaptée selon leurs besoins, avec la possibilité d'installer la maquette et de former les utilisateurs. Après l'achat, on reste disponibles pour aider : on répond aux questions, on répare si besoin, on fait la maintenance, et on met à jour le logiciel. On propose aussi des formations continues, et surtout, on écoute leurs retours pour continuer à s'améliorer.

IV.2.5 Partenaires clés

a. Qui sont nos partenaires clés ?

Nos partenaires clés sont d'abord les centres de simulation médicale. Ils nous aident à tester la maquette dans des conditions réelles, à repérer ses points faibles, et à proposer des idées concrètes

pour l'améliorer. Nous travaillons aussi avec des ingénieurs en électronique et en informatique, qui s'occupent de la conception technique de l'interface et du système de détection. Pour fabriquer la partie souple de la maquette, nous collaborons avec des personnes ou des petites entreprises spécialisées dans le moulage en silicone. D'autres partenaires nous aident à faire connaître notre produit : ce sont des professionnels du marketing. Enfin, pour livrer la maquette aux clients, nous comptons sur des sociétés de livraison fiables comme Yalidine ou d'autres services similaires.

b. Quels sont les partenariats qui nous aident à réduire les coûts, à accéder à de nouvelles ressources ou à améliorer notre proposition de valeur ?

Les centres de simulation nous permettent de faire des essais sur le terrain, sans frais supplémentaires, tout en recevant des retours utiles pour rendre la maquette plus efficace. Les ingénieurs nous offrent leurs compétences techniques pour améliorer les performances du système, tout en travaillant localement, ce qui réduit les coûts. Les partenaires qui s'occupent de l'emballage en silicone souple nous aident à produire une maquette réaliste à un coût abordable. Et grâce aux experts en communication, nous pouvons atteindre plus facilement nos clients cibles, sans avoir à passer par de grandes agences. Les transporteurs nous permettent de livrer rapidement et à moindre coût dans tout le pays.

c. Comment pouvons-nous aligner nos intérêts avec ceux de nos partenaires ?

Pour avancer ensemble, nous cherchons à construire des relations simples et équilibrées avec chacun de nos partenaires. Par exemple, les centres de simulation qui nous aident à tester la maquette peuvent recevoir des prototypes gratuits ou avoir un accès prioritaire aux nouvelles versions. Les ingénieurs peuvent développer avec nous des solutions innovantes, tout en valorisant leur savoir-faire. Les personnes qui fabriquent les pièces en silicone peuvent compter sur des commandes régulières, ce qui soutient leur activité. Les professionnels du marketing trouvent aussi un intérêt à faire partie d'un projet utile et local. Enfin, les sociétés de livraison bénéficient d'un partenariat stable avec des expéditions claires et organisées.

IV.2.6 Activités clés

a. Quelles sont les actions principales que nous devons entreprendre pour livrer notre proposition de valeur ?

Pour offrir une maquette de qualité, réaliste et accessible, nous devons d'abord concevoir un système fiable, en travaillant sur l'électronique, l'informatique et la structure physique. Ensuite, il est essentiel de fabriquer la maquette avec des matériaux adaptés, notamment le silicone souple pour reproduire le toucher. Nous devons aussi tester le produit dans des centres de simulation, afin d'améliorer ses performances et son réalisme. Enfin, nous préparons des documents simples et des scénarios cliniques clairs pour accompagner les utilisateurs dans leur apprentissage.

b. Quelles sont les opérations essentielles pour notre entreprise ?

Les opérations essentielles sont la conception technique, la fabrication des différentes parties de la maquette, l'assemblage, et les tests de bon fonctionnement. Il faut aussi assurer la communication avec les clients, organiser les livraisons, et maintenir un bon suivi après la vente (réponses aux questions, mises à jour, réparations). La coordination avec nos partenaires techniques et médicaux fait aussi partie des tâches quotidiennes importantes

c. Quelles sont les activités qui créent le plus de valeur pour nos clients ?

Ce que les clients apprécient le plus, c'est de pouvoir s'exercer avec une maquette qui ressemble à la réalité. Ils aiment aussi pouvoir essayer le produit avant de l'acheter, voir des vidéos explicatives, et avoir quelqu'un à qui poser leurs questions. Quand ils savent qu'on peut les aider rapidement pour une mise à jour ou une réparation, ça les rassure. C'est ce genre de petites attentions qui font vraiment la différence pour eux.

IV.2.7 Ressources clés

a. Quels sont nos actifs matériels, immatériels et humains essentiels ?

Nous avons besoin de plusieurs types de ressources pour faire avancer notre projet. Sur le plan matériel, il y a les composants électroniques (capteurs, microcontrôleurs), les outils de montage, et les matériaux pour fabriquer la partie souple de la maquette, comme le silicone. Côté immatériel, nous avons le logiciel que nous avons développé, les scénarios cliniques, et tout le savoir-faire autour de la pédagogie médicale. Et bien sûr, nos ressources humaines sont essentielles :

ingénieurs, étudiants, formateurs et professionnels de santé travaillent ensemble pour concevoir, tester et améliorer le produit.

b. Quels sont les outils, les technologies ou les partenariats dont nous avons besoin pour réussir ?

Nous avons besoin d'outils simples mais efficaces, comme des microcontrôleurs, des logiciels de programmation, et des imprimantes pour les tests de boîtiers. La technologie embarquée est au cœur du projet, mais nous avons aussi besoin d'outils pédagogiques (fiches, vidéos) pour accompagner les utilisateurs. Côté partenariats, nous comptons sur les centres de simulation médicale pour tester le produit, les ingénieurs pour la partie technique, les personnes qui fabriquent les parties en silicone, et les entreprises de livraison pour que la maquette arrive chez les clients en bon état.

c. Quels sont les principaux avantages concurrentiels de nos ressources ?

Notre plus grand avantage, c'est que nous avons réussi à combiner des ressources locales, simples et efficaces pour créer une maquette de qualité. Elle est conçue avec des moyens accessibles, mais elle reste interactive, réaliste, et bien adaptée à la formation médicale. Contrairement aux maquettes importées, notre solution est beaucoup plus abordable et peut être personnalisée facilement selon les besoins des utilisateurs.

IV.2.8 Charges et coûts

a. Quels sont les coûts fixes et variables associés à notre modèle économique ?

Nos coûts fixes comprennent principalement l'atelier de travail (prix de location environ 60 0000 dinars par ans + décoration et travaux environ 20 0000 dinars), les outils de fabrication (environ 60 000 dinars), le développement du logiciel (environ 500 000 dinars), les moules pour la couche de silicone et les organes (environ 50 000 dinars), et l'achat régulier de composants électroniques. À cela s'ajoutent les dépenses liées à la conception technique, comme le temps passé par les ingénieurs et les développeurs (environ 30 0000 dinars par mois). Nos coûts variables changent selon la quantité produite. Ils incluent le silicone souple utilisé pour chaque maquette pour la

couche et les organes (environ 25 000 dinars), les cartes électroniques (50 000 dinars par carte), les capteurs et moteurs (environ 15 000 par maquette) et la fabrication de base de maquette (10 0000 dinars).

b. Quels sont les coûts les plus importants pour notre entreprise ?

Les dépenses les plus importantes concernent la fabrication de la maquette. Le moulage en silicone de couche est les organes et l'assemblage électronique et la production de base représente une grande partie du budget. Ensuite viennent les coûts liés au développement du logiciel et à l'amélioration technique du produit. Enfin, la communication pour faire connaître notre produit peut demander un certain budget, surtout lors des premières phases.

c. Comment pouvons-nous réduire les coûts ou améliorer l'efficacité de nos opérations ?

Pour réduire les coûts, nous pouvons miser sur la fabrication locale, ce qui évite les frais d'importation. En réutilisant les moules plusieurs fois, on limite aussi les dépenses de production. Certaines tâches simples, comme l'emballage ou l'envoi de documents, peuvent être automatisées ou confiées à des partenaires fiables. Enfin, travailler avec des étudiants ou des écoles spécialisées pour la communication ou les tests de produit peut nous permettre d'avancer tout en maîtrisant le budget.

IV.2.9 Revenus

a. Quels produits ou services nos clients sont-ils prêts à payer ?

Nos clients sont prêts à payer pour une maquette de simulation complète, facile à utiliser, et fidèle à la réalité. Ils cherchent un outil fiable, abordable, et adapté à la formation médicale. En plus de la maquette, certains sont prêts à payer pour accéder à des scénarios cliniques supplémentaires, recevoir des mises à jour du logiciel ou bénéficier d'un service de maintenance en cas de besoin.

b. Quels sont les différents moyens par lesquels nous pouvons générer des revenus ?

Nous générons des revenus principalement grâce à la vente directe de la maquette. Nous proposons aussi un système d'abonnement ou de licence pour donner accès à de nouveaux scénarios cliniques

et à des mises à jour logicielles régulières. Lorsqu'un client a besoin d'une réparation ou d'une intervention hors garantie, des frais de maintenance peuvent s'ajouter. Nous pouvons également vendre nos produits lors de salons, conférences ou événements professionnels, et proposer des facilités de paiement pour les centres à budget limité.

c. Quel est notre modèle de tarification ?

Notre tarification est pensée pour être accessible. Nous proposons un prix raisonnable (environ 120 0000 dinars centimes), bien inférieur à celui des maquettes importées (environ 500 millions dinars centimes), tout en gardant un bon niveau de qualité. La formation initiale est offerte avec chaque maquette. Si besoin, nous permettons un paiement en plusieurs fois, pour s'adapter aux budgets des établissements de formation. L'abonnement aux scénarios supplémentaires reste optionnel, pour laisser le choix aux clients selon leurs besoins.

IV.3 Récapitulation

La réalisation du **Business Model Canvas (BMC)** a été une étape essentielle dans notre projet de conception d'une maquette de simulation d'examen clinique d'un abdomen douloureux. Cet outil nous a permis de structurer nos idées et d'avoir une vision claire et globale de la manière dont notre projet peut être développé et mis en place. Grâce à lui, nous avons pu identifier les différents éléments qui composent notre modèle économique et comprendre comment chacun d'eux interagit avec les autres.

Ce travail nous a d'abord aidés à préciser notre **proposition de valeur**, qui est au cœur du projet. Nous avons confirmé que notre objectif principal est de proposer une maquette locale, réaliste et interactive, qui répond aux besoins des étudiants en médecine et des centres de simulation. Elle permet de s'entraîner dans de bonnes conditions, sans risque pour les patients, tout en réduisant les coûts élevés liés aux maquettes importées.

Le BMC nous a également permis d'identifier clairement **nos clients et partenaires clés**. Nous savons maintenant à qui s'adresse notre produit : les centres de simulation intégrés aux facultés de médecine, les étudiants en médecine, et les centres de formation continue. En parallèle, nous avons défini les partenariats indispensables pour mener à bien ce projet, comme la collaboration avec des

ingénieurs, des fabricants locaux de pièces en silicone, ainsi que des sociétés de livraison fiables pour la distribution.

L'étude des **ressources et des activités clés** nous a donné une meilleure idée de ce qu'il faut mettre en place pour fabriquer et améliorer la maquette. Elle a montré que la production locale et l'utilisation de matériaux accessibles représentent un véritable avantage, car elles permettent de réduire les dépenses tout en gardant un bon niveau de qualité. Nous avons aussi identifié les tâches prioritaires, comme le développement électronique, l'assemblage, les tests de validation et l'accompagnement des utilisateurs après l'achat.

Sur le plan financier, l'analyse des **coûts et des revenus** a confirmé la faisabilité du projet. Nous avons pu estimer les coûts fixes, comme l'atelier de travail, le développement logiciel et les moules, ainsi que les coûts variables, comme les composants électroniques et le silicone. Nous avons également défini notre stratégie de tarification, qui repose sur un prix abordable, bien inférieur à celui des produits importés. Cette approche permet de rendre notre maquette accessible à un plus grand nombre de structures de formation tout en garantissant la viabilité du projet.

En conclusion, le BMC nous a servi de **guide stratégique** tout au long de notre réflexion. Il a mis en lumière les points forts du projet, tout en nous aidant à repérer les défis à relever. Ce travail nous donne aujourd'hui une feuille de route claire pour continuer à développer notre maquette et l'améliorer au fil du temps. À l'avenir, ce modèle pourra être adapté pour intégrer de nouvelles fonctionnalités, toucher d'autres spécialités médicales, et répondre aux besoins d'un public plus large. Ainsi, notre projet contribue non seulement à améliorer la formation médicale, mais aussi à rendre cette formation plus accessible, plus interactive et plus efficace.

V. Chapitre V : Perspectives

Le prototype de maquette de simulation développé représente un outil prometteur pour l'apprentissage pratique de l'examen clinique abdominal. Néanmoins, plusieurs perspectives d'amélioration peuvent être envisagées afin de renforcer son réalisme, son efficacité pédagogique et son potentiel d'évolution. Ces améliorations visent non seulement à enrichir l'expérience sensorielle et cognitive des étudiants, mais également à rapprocher la simulation de l'interaction avec un patient réel, permettant ainsi un apprentissage plus complet et immersif.

Une première perspective concerne l'**ajout de nouveaux scénarios cliniques**. En augmentant la variété et la complexité des situations simulées, la maquette permettrait aux étudiants de s'entraîner dans un environnement plus diversifié et dynamique. Cette extension offrirait la possibilité de développer de manière plus approfondie les compétences d'évaluation clinique, tout en rendant l'expérience de simulation plus stimulante et proche de la pratique médicale réelle.

Une deuxième perspective est l'**intégration des organes internes et des structures simulant des masses ou tumeurs**. Cette amélioration permettrait aux étudiants d'identifier non seulement les zones douloureuses, mais également les variations anatomiques et les anomalies palpables, en rendant la maquette plus proche d'un patient réel. La présence de structures internes modulables offrirait un retour tactile plus complexe et réaliste, contribuant à la formation des étudiants et à leur capacité à appréhender correctement la topographie abdominale.

Sur le plan des matériaux, l'utilisation d'un **silicone dont la texture se rapproche davantage de celle des tissus humains** permettrait de reproduire fidèlement la sensation tactile ressentie lors de la palpation. Cette amélioration renforcerait la perception des variations de fermeté et des textures anatomiques, et améliorerait l'expérience pratique des étudiants. Un matériau plus réaliste est essentiel pour développer la mémoire sensorielle et la précision manuelle, deux éléments indispensables à un examen clinique fiable et efficace.

L'intégration de la **réalité virtuelle (VR) avec la maquette physique** constitue une autre avancée majeure. La VR permet de visualiser la maquette comme un patient réel et de percevoir les réactions de la simulation de manière très proche de la réalité clinique. Contrairement à la VR

seule, qui ne restitue pas le toucher, le couplage avec la maquette physique offre à l'étudiant la combinaison de la **perception visuelle** et du **retour tactile**, reproduisant les interactions qu'il pourrait avoir avec un patient réel. Cette approche multimodale permet de vivre une expérience immersive complète, où l'étudiant peut observer et ressentir simultanément la réponse du corps simulé, ce qui renforce considérablement l'apprentissage pratique.

Par ailleurs, la **simulation de la défense abdominale** pourrait être améliorée par combiner les moteurs vibrants avec un mécanisme de tension mécanique pour offrir un retour encore plus réaliste et modulable selon la palpation effectuée. Cela permettrait aux étudiants d'évaluer plus finement la résistance musculaire et de mieux différencier les signes cliniques. De même, la **simulation de la contracture abdominale** pourrait être automatisée grâce à des systèmes de gonflage contrôlés électroniquement, garantissant une réponse précise et uniforme, indépendamment de l'intervention manuelle. Cette automatisation renforcerait la fiabilité de la simulation et faciliterait la répétition des exercices, offrant une expérience d'apprentissage plus standardisée et reproductible.

En combinant ces perspectives, la maquette pourrait évoluer vers un outil pédagogique complet et polyvalent, capable de reproduire à la fois la réalité visuelle, tactile et interactive d'un patient réel. Ces améliorations contribueraient à renforcer la pertinence éducative de la simulation, à préparer les étudiants à la pratique clinique avec plus de confiance et de précision, et à ouvrir la voie à des applications plus avancées dans la formation médicale. À long terme, ce projet pourrait constituer une référence pour la simulation clinique, en offrant une expérience immersive complète alliant **réalisme, interactivité et feedback sensoriel** pour l'apprentissage de l'examen abdominal.

Conclusion générale

Ce mémoire consacre l'aboutissement d'un **travail de huit mois** menés avec passion, rigueur et créativité, autour de la conception et de la réalisation d'une **maquette interactive de simulation d'examen clinique d'un abdomen douloureux**, baptisée TACTUS. Ce projet s'inscrit dans une dynamique d'innovation pédagogique en simulation médicale, visant à doter les établissements de formation en santé d'outils réalistes, accessibles et fabriqués localement. En combinant électronique, mécanique et approche pédagogique, TACTUS se veut une passerelle entre la théorie et la pratique, permettant aux étudiants en médecine d'apprendre les gestes cliniques dans un environnement sécurisé, interactif et stimulant.

La conception du prototype a reposé sur des choix techniques à la fois **simples, ingénieux et fonctionnels**. La structure de la maquette associe une **base en éponge**, recouverte d'une **couche de silicone** reproduisant la texture et la souplesse de la peau humaine. À l'intérieur, des **sacs gonflables fixés par des scratchs** simulent la **contracture abdominale**, tandis que des **moteurs vibrants** reproduisent la **défense musculaire**. Ce système, contrôlé par une **carte Arduino Méga**, est couplé à des **capteurs FSR** permettant de détecter la pression exercée lors de la palpation. L'ensemble est piloté par une **interface PC intuitive**, développée sous **CustomTkinter**, qui permet de sélectionner les régions douloureuses, de gérer les intensités de réaction et de visualiser les scénarios cliniques en temps réel. Par son architecture modulaire, TACTUS associe **réalisme tactile, interactivité et adaptabilité**, tout en conservant un coût de fabrication modeste.

Les résultats obtenus lors des **tests utilisateurs** sont particulièrement encourageants. Sur **11 participants**, tous ont jugé le **réalisme tactile satisfaisant**, 91 % ont confirmé la **précision des repères anatomiques**, et plus de 80 % ont estimé que la **simulation de la défense et de la contracture** était crédible. Ces chiffres témoignent du **succès pédagogique** de la maquette et de son potentiel pour renforcer l'apprentissage actif des gestes cliniques. Grâce à elle, les étudiants peuvent répéter les manipulations, observer les réactions simulées et perfectionner leurs techniques sans risque pour le patient. Les **calibrations précises** des capteurs FSR ont permis d'ajuster les seuils de palpation selon la profondeur et la zone anatomique, garantissant une cohérence entre la réponse simulée et la réalité clinique.

L'analyse comparative avec l'état de l'art a mis en lumière la place particulière de TACTUS entre deux modèles internationaux de référence : le **brevet WO2014145013A1**, très réaliste mais coûteux et complexe, et le **brevet CN112652206A**, plus simple mais limité. Notre prototype se situe dans une **position intermédiaire intelligente**, combinant le **réalisme du premier** avec la **simplicité et l'accessibilité du second**. Il démontre qu'il est possible de concevoir un simulateur performant à partir de ressources locales, tout en répondant aux exigences de la formation clinique moderne. Ce positionnement équilibré fait de TACTUS une **solution innovante et durable**, adaptée au contexte éducatif national.

Sur le plan économique et stratégique, l'intégration du **Business Model Canvas (BMC)** a permis d'envisager la **viabilité réelle du projet** au-delà de sa dimension académique. L'analyse du BMC a identifié les **partenaires clés** (facultés de médecine, centres de simulation, fournisseurs électroniques), les **segments cibles** (étudiants, enseignants, institutions universitaires), ainsi que la **structure des coûts** et les **sources potentielles de revenus**. Ce modèle démontre que la **production locale** de TACTUS permettrait de réduire considérablement les coûts liés à l'importation de simulateurs étrangers, tout en **favorisant l'autonomie technologique** et en **soutenant l'économie pédagogique nationale**. Il ouvre également la voie à une **commercialisation future** du dispositif, sous la forme de kits modulaires destinés aux écoles de santé ou aux centres de formation continue.

Malgré ces résultats très positifs, certaines **perspectives d'amélioration** restent ouvertes. La **simulation de la défense abdominale** pourrait gagner en réalisme en **combinant les moteurs vibrants avec un mécanisme de tension mécanique**, capable de reproduire la rigidité musculaire progressive observée chez un patient réel. De plus, l'ajout de **capteurs complémentaires** (température, résistance, déformation) ou de **scénarios cliniques enrichis** renforcerait la dimension pédagogique et la précision de la simulation. Enfin, une **évaluation à plus grande échelle** permettrait de valider statistiquement l'impact de la maquette sur l'apprentissage des étudiants.

En définitive, le projet TACTUS représente bien plus qu'un simple prototype : il symbolise une **preuve de concept réussie**, alliant innovation, réalisme et accessibilité. Par sa conception ingénieuse, ses performances évaluées positivement et son potentiel d'évolution, il s'impose

comme un **outil pédagogique prometteur** au service de la formation médicale. Ce travail démontre que la **création locale de technologies biomédicales** est non seulement possible, mais aussi essentielle pour répondre aux défis actuels de l'enseignement clinique.

Ainsi, ce mémoire ne se clôt pas seulement sur la réussite d'un projet, mais ouvre la voie à une **nouvelle génération de simulateurs médicaux algériens**, pensés, conçus et fabriqués pour les besoins réels de la formation. TACTUS incarne cette ambition : celle d'une simulation médicale plus **autonome, inclusive et innovante**, au service de la qualité et de la modernité de l'apprentissage clinique.

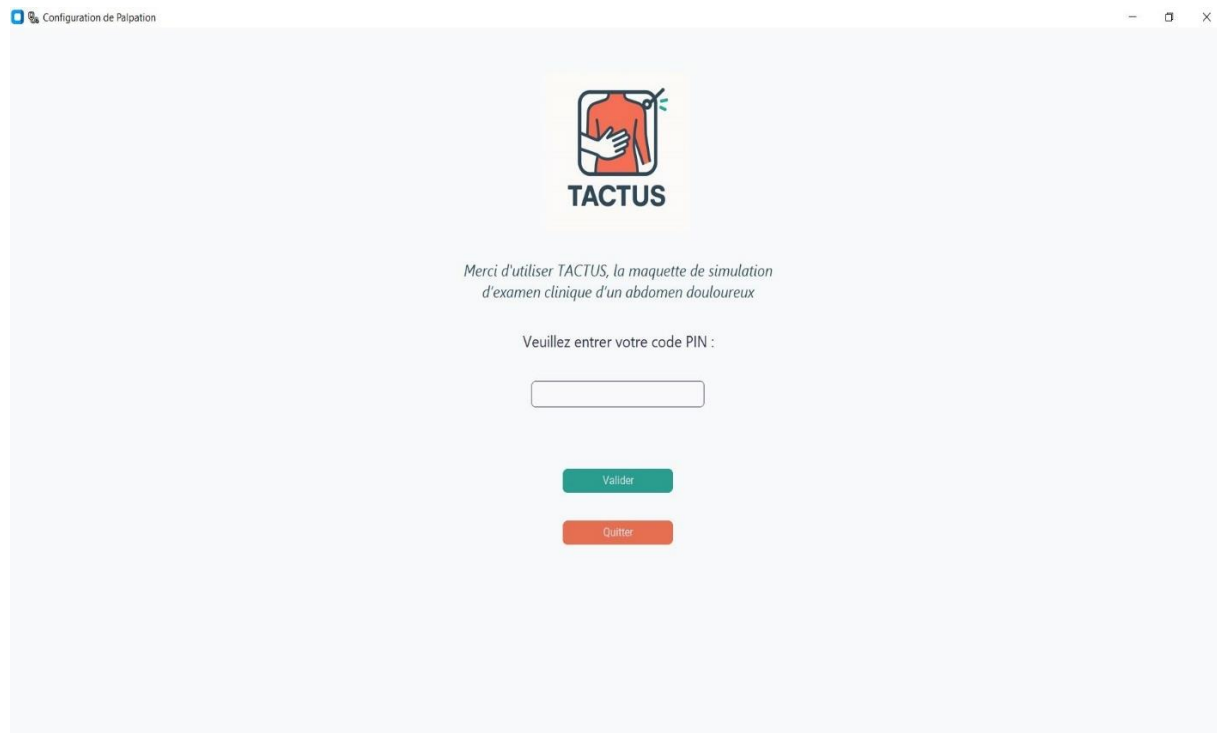
Bibliographie

- [1] Kenhub, 2023. [En ligne]. Available: <https://www.kenhub.com/en/library/anatomy/abdomen-and-pelvis>. [Accès le 2 8 2025].
- [2] U. T. P. & V. R. Bommas-Ebert, Cours d'anatomie, D. B. Supérieur, Éd., Bruxelles, 2008.
- [3] Paul, «Wadaef,» 2 July 2024. [En ligne]. Available: <https://fr.wadaef.net/les-9-regions-de-labdomen-et-ses-organes/>. [Accès le 22 August 2025].
- [4] «stock.adobe,» [En ligne]. Available: <https://stock.adobe.com/sk/>. [Accès le 26 08 2025].
- [5] V. L. C. a. J. A. Kruse, Clinical Methods: The History, Physical, and Laboratory Examinations, 1990.
- [6] C. D. Lyon C, «Diagnosis of acute abdominal pain in older patients,» *Am Fam Physician* (abréviation de *American Family Physician*), vol. 74, n° 19, pp. 1537-1544, 2006.
- [7] S. Khairi, «wikimedecine,» 22 september 2024. [En ligne]. Available: https://www.wikimedecine.fr/Douleurs_abdominales_aigu%C3%ABs_-_Orientation_%C3%A9tiologique. [Accès le 22 August 2025].
- [8] M. Direct, «"Douleurs abdominales : Causes et traitements",» [En ligne]. Available: <https://www.medecindirect.fr/symptomes/douleurs-abdominales>.
- [9] «pinterest,» [En ligne]. Available: <https://www.pinterest.com/pin/543598617522361210/>. [Accès le 26 08 2026].
- [10] J. C. G. a. G. S. S. Boet, La simulation en santé : de la théorie à la pratique, E. Masson, Éd., Paris, 2013.
- [11] D. M. K. J. A. M. N. S. S. G. A. H. a. F. J. P. R. M. Hamm, «"Effects of using an abdominal simulator to develop palpatory competencies in 3rd year medical students",» *BMC Medical Education*, vol. 22, n° 11, p. 63, 2022.
- [12] Y. Zhang, «Simulateur d'abdomen pour la formation médicale». Brevet WO2014145013A1, 2014.

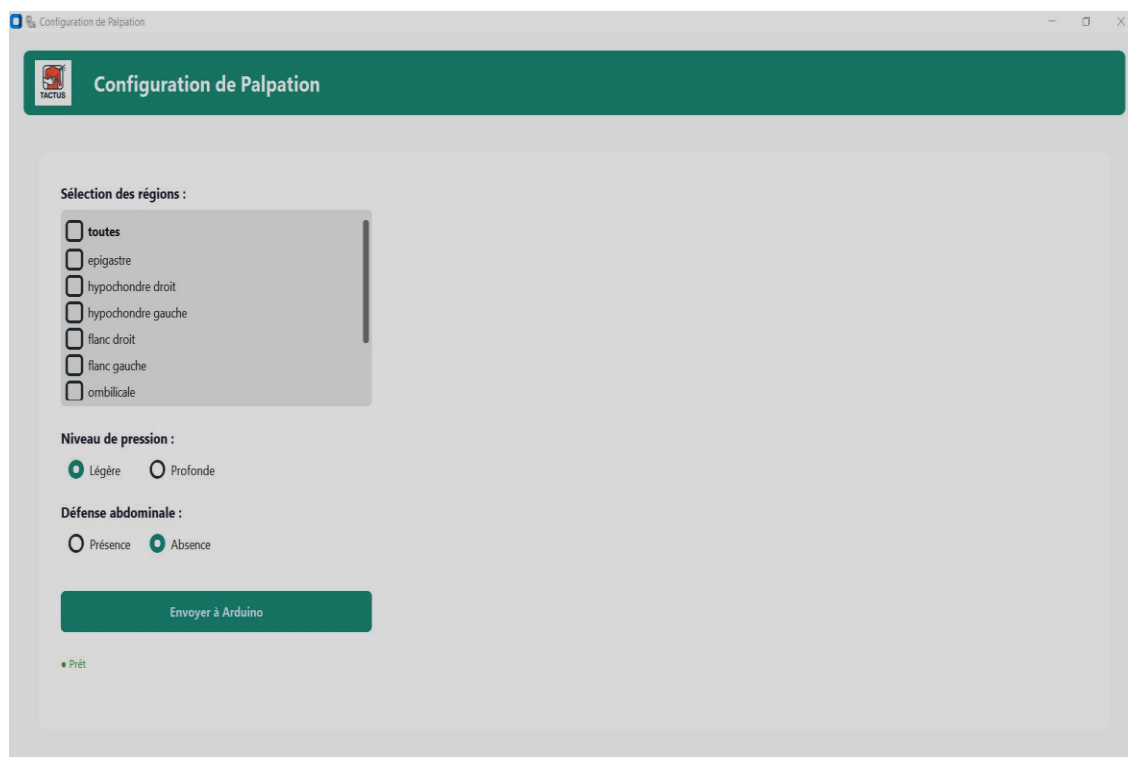
- [13] Z. Li, «Dispositif de simulation d'abdomen pour l'enseignement clinique». Brevet CN112652206A, 2021.
- [14] «has-sante,» 2019. [En ligne]. Available: https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/2019-02/outil_11_debriefing_en_simulation.pdf. [Accès le 04 10 2025].
- [15] «Amazon,» [En ligne]. Available: <https://www.amazon.fr/Eurohandisplay-Mannequin-vitrine-bapt%C3%A0me-pivotante/dp/B07KS6GJK3?th=1>.
- [16] «made-in-china,» [En ligne]. Available: <https://huadaisilicone.en.made-in-china.com/>.
- [17] «ARDUINODOCS,» 2024. [En ligne]. Available: <https://docs.arduino.cc/hardware/mega-2560>.
- [18] W. Commons, «Wikimedia,» [En ligne]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arduino_MEGA2560.png. [Accès le 24 08 2025].
- [19] wikipedia, «wikipedia,» [En ligne]. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Capteur_de_force_%C3%A0_r%C3%A9sistance. [Accès le 25 08 2025].
- [20] «dfrobot,» 2014. [En ligne]. Available: https://wiki.dfrobot.com/DFPlayer_Mini_SKU_DFR0299. [Accès le 25 8 2025].
- [21] O. L. d. Weck, Fundamentals of Systems Engineering, Cambridge, 2009.
- [22] D. L. a. T. B. Reddy, Handbook of Batteries, 4th ed, New York, 2010.
- [23] «Texas Instruments,» 2021. [En ligne]. Available: <https://www.ti.com/>. [Accès le 26 08 2025].
- [24] T. R. Müller, «GitHub Repository,» 2023. [En ligne]. Available: <https://github.com/TomSchimansky/CustomTkinter>. [Accès le 26 08 2025].
- [25] Autodesk, «Tinkercad,» [En ligne]. Available: <https://www.tinkercad.com>. [Accès le 24 août 2025].
- [26] I. Electronics, «cdn.sparkfun,» [En ligne]. Available: <https://cdn.sparkfun.com/assets/c/4/6/8/b/2010-10-26-DataSheet-FSR406-Layout2.pdf>.
- [27] Y. P. T. C. Alexander Osterwalder, Business Model Generation: A Handbook For Visionaries, Game Changers, and Challengers, J. W. & Sons, Éd., 2010.

- [28] C. H. L. a. C. H. H. J. L. Hsu, «"Digitizing abdominal palpation with a pressure measurement and positioning device",» *PeerJ*, vol. 8, n° 1e10511, 2020.
- [29] M. Technology, «microchip,» [En ligne]. Available: <https://www.microchip.com/en-us/product/atmega2560>.

Annexe 1:écran d'accueil



Annexe 2:écran principale



Annexe 3:Questionnaire de satisfaction



Faculté de TECHNOLOGIE

Evaluation de prototype d'une maquette de simulation d'examen clinique d'un abdomen douloureux

Cher(e) apprenant(e), Dans le cadre d'un projet de fin d'étude, nous avons développé un prototype d'une maquette de simulation d'examen clinique d'un abdomen douloureux. Votre expérience et votre feedback sont essentiels pour nous aider à évaluer son efficacité, son réalisme et son utilité dans votre apprentissage. Ce questionnaire est anonyme et devrait vous prendre environ 5 à 7 minutes. Veuillez lire attentivement chaque affirmation et indiquer votre niveau de satisfaction en cochant la case qui correspond le mieux à votre expérience. Nous vous remercions par avance pour votre temps et votre contribution précieuse.

Questionnaire de satisfaction :

1. Le réalisme tactile de la maquette (texture de la peau, fermeté des tissus) :
 - Satisfait
 - Moyennement satisfait
 - Non satisfait
2. La précision des régions anatomique de la paroi abdominale :
 - Satisfait
 - Moyennement satisfait
 - Non satisfait
3. La réponse de la maquette à la palpation (défense, contracture, douleur) :
 - Douleur**
 - Satisfait
 - Moyennement satisfait
 - Non satisfait
 - Défense**
 - Satisfait
 - Moyennement satisfait
 - Non satisfait
 - Contracture**
 - Satisfait
 - Moyennement satisfait
 - Non satisfait
4. La variété des scénario cliniques simulés (cas clinique) :
 - Satisfait
 - Moyennement satisfait
 - Non satisfait
5. Le rôle de la maquette dans l'apprentissage par simulation de l'examen d'abdomen humain :
 - Satisfait
 - Moyennement satisfait
 - Non satisfait

Annexe 4: grille d'observation

Grille d'observation : la performance de la Maquette des Douleurs Abdominales

Objectif : Vérifier si l'étudiant identifie correctement les signes clés grâce au réalisme de la maquette.

1. Identification des régions de l'abdomen L'étudiant a-t-il correctement identifié et nommé les neuf régions principales de l'abdomen ?

- Oui
- Non

<input type="checkbox"/> Hypochondre droit	<input type="checkbox"/> Flanc droit	<input type="checkbox"/> Fosse iliaque
<input type="checkbox"/> Hypochondre gauche	<input type="checkbox"/> Flanc gauche	gauche
<input type="checkbox"/> Épigastre	<input type="checkbox"/> Fosse iliaque droit	<input type="checkbox"/> Ombilicale
<input type="checkbox"/> Hypogastre		

2. Localisation du siège de la douleur L'étudiant a-t-il précisément localisé la zone douloureuse ?

- Hypochondre droit
- Hypochondre gauche
- Épigastre
- Hypogastre

<input type="checkbox"/> Flanc droit	<input type="checkbox"/> Fosse iliaque
<input type="checkbox"/> Flanc gauche	gauche
<input type="checkbox"/> Fosse iliaque droit	<input type="checkbox"/> Ombilicale

- Oui
- Non

3. Identification du siège de la défense L'étudiant a-t-il identifié la zone de défense abdominale ?

- Hypochondre droit
- Hypochondre gauche
- Fosse iliaque droit
- Fosse iliaque gauche

- Oui
- Non

4. Reconnaissance de la contracture L'étudiant a-t-il reconnu la présence d'une contracture abdominale ?

- Oui
- Non

"Merci pour votre participation et vos efforts durant cette séance."

