

Prestation d'études complémentaires relatives aux conditions de conservation et au transport de la Tapisserie de Bayeux dans le cadre de son prêt par l'Etat français au Royaume-Uni

Appel d'offre 2025-42-DRAC

Rapport final

15/05/2026

Groupement SMACH

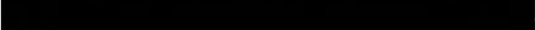
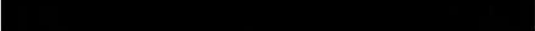
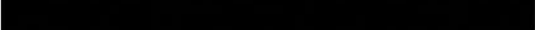
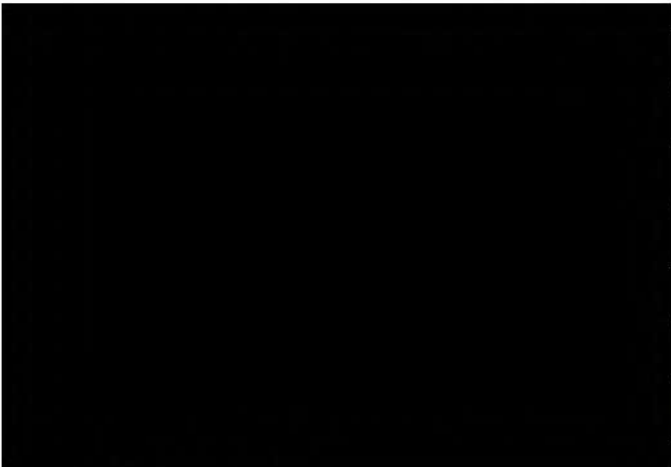
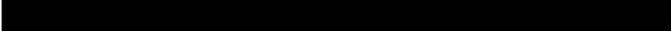
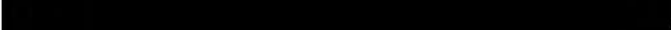
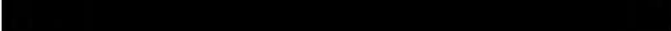
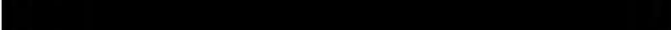
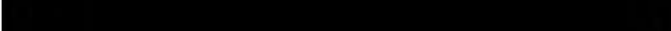
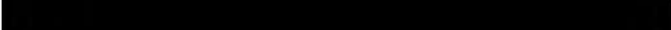
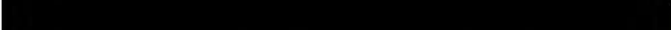
SAS ENTREPRISE DE PROMOTION DES ETUDES MECANIKES POUR LE PATRIMOINE (SMACH) 825 chemin des Roards, 84830 SERIGNAN-DU-COMTAT SIRET : 89002572900025 Tél. : +33 6 37 63 47 62 admin@s-ma-c-h.com	EURL Thalia Bouzid Thalia Bajon Bouzid 8 passage Brulon, 75012 Paris SIRET : 834 361 412 00010 Tél. : + 33 (0)6 21 07 30 95 thbajonbouzid@gmail.com
ÉLODIE APARICIO-BENTZ 15 rue de l'asile popincourt, 75011 Paris Siret : 429 186 281 29 Tél. : + 33 (0)6 11 22 82 37 elodie@apariciobentz.fr	EURL RD Conservation Raphaëlle Dejean 8 passage Brulon, 75012 Paris, SIRET : 51030037900037 Tél. : + 33 (0)6 61 64 27 87 raphaelledejean@yahoo.fr
SAS Hizkia France, 130 rue des Chardonnerets, 93290 Tremblay-en-France, SIRET : 844 383 380 00012 Tél. : + 33 (0)1 49 89 89 89 info.paris@hizkia.com	SAS Atelier Tournillon 825 chemin des Roards, 84830 Sérignan du Comtat, SIRET : 477 872 550 00025 Tél. : + 33 (0)4 90 30 77 19 contact@ateliertournillon.com

POUR LA DIRECTION REGIONALE DES AFFAIRES CULTURELLES DE NORMANDIE

13B rue de Saint Ouen

BP 53314036 CAEN

Table des matières

1. Contexte de l'étude	4
1.1. Tapisserie de Bayeux.....	6
1.2. Limite de la réponse.....	8
1.2.1. Synthèse de « Étude de faisabilité du transport et du stockage de la Tapisserie de Bayeux » de 2022	8
1.2.2. Rappel des contraintes des 2 mm/s.....	10
2. Logistique du transport.....	12
	12
	13
	16
	17
2.2. Caractéristique du camion de transport.....	18
	20
	21
	21
	22
	22
	24
	24
	41
3. Caisse de transport	47
3.1. Conception	47
3.2. Test mécaniques	51
4. Protocole de mesures vibratoires.....	65
4.1. Sélection des grandeurs à mesurer	65
4.2. Emplacement de la mesure	65
4.3. Paramétrages des capteurs	70

5.	Convoiement et étape des transports	70
5.1.	Installation des capteurs dans le système de transfert dans les locaux techniques de la ville de Bayeux.....	70
5.2.	Transfert du paravent vers les réserves de la Tapisserie de Bayeux pour une mise en caisse en situation réelle.....	72
5.3.	[REDACTED]	76
5.4.	[REDACTED]	85
5.5.	Chronogramme synthétique des opérations.....	89
6.	Résultats.....	91
6.1.	Comparaison entre la caisse interne et le panneau inférieur de la structure de transfert	91
6.2.	Comportement thermo-hygro-mécanique.....	109
6.2.1.	Résultat lors du voyage test no1 en février 2026.....	109
6.2.2.	Résultat lors du voyage à blanc en avril 2026	111
6.3.	Résumé.....	117
7.	Matériaux de conservation utilisés.....	118
6.4.	Méthodologie de fabrication du fac-simile	120
8.	Conclusion.....	125
9.	Annexes.....	127
8.1.	Fiche technique caisse	127
8.2.	Fiche technique capteur	127
8.2.1.	StaRT by SMACH	127
8.2.2.	MSR175	128

produire des protocoles validés permettant un transport reproductible, documenté et défendable auprès des autorités de tutelle, de l'emprunteur et des comités de pilotage.

Le périmètre du marché a été ajusté en début d'exécution par la DRAC Normandie en raison des contraintes de calendrier propres au prêt. La modification principale porte sur le second livrable structurant : alors que le CCTP initial prévoyait la rédaction d'un *cahier des charges* pour la commande, dans un second marché, d'une caisse internationale définitive antivibratoire, climatique et sécurisée, le périmètre arrêté au démarrage du marché a substitué à cette étude documentaire la *fourniture de la caisse internationale définitive elle-même*. Le présent marché intègre par conséquent à la fois la phase d'études et la livraison de la caisse définitive, sans recours à un second marché.

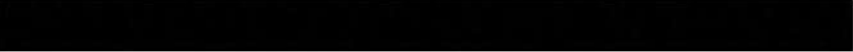
La prestation a été conduite en trois phases :

- **Phase 1 — Préparation** : mise au point d'un protocole de mesure des vibrations et du climat (température, hygrométrie, pression) appliqué au système de transfert (paravent et coques) et à un fac-similé de la Tapisserie d'environ 70 m ; fourniture d'une caisse de transport instrumentée préfigurant la caisse définitive ; pose des capteurs : accéléromètres, thermo-hygromètres et système de vidéosurveillance ; préparation du paravent (matelas en ouate de polyester recouverte de Tyvek®, tubes en mousse de polyéthylène inerte aux angles, mousses peigne) et installation du fac-similé selon le protocole fourni par le pouvoir adjudicateur ; analyse des données préliminaires et validation du protocole en vue de la Phase 2.
- **Phase 2 — Transport-test grandeur nature Bayeux–Londres–Bayeux** : exécution d'un aller-retour complet entre Bayeux et Londres selon le protocole validé en fin de Phase 1, à destination [REDACTED]. Le choix de cette destination, en lieu et place du British Museum lui-même, permet de tester l'intégralité du trajet — y compris les ruptures de charge, [REDACTED] et les formalités douanières — dans des conditions logistiques et sécuritaires représentatives, sans engager prématurément le site muséal de l'emprunteur. Cette phase comprend la prise des mesures vibratoires et climatiques sur trajet réel, l'analyse des données et l'ajustement du protocole. Elle donne lieu à la production : (i) des préconisations à destination de l'emprunteur (British Museum) et de son prestataire de transport ; (ii) des spécifications techniques retenues pour la caisse internationale définitive. Elle inclut les présentations orales associées et la participation au COPIL sécurité.
- **Phase 3 — Voyage à blanc Bayeux–British Museum** : exécution du voyage à blanc complet jusqu'au British Museum selon le protocole validé et amélioré à l'issue de la Phase 2. Les améliorations portent notamment sur la mise en place d'une plateforme en



Cette phase consolide les acquis du transport-test, valide le protocole sur le trajet définitif et donne lieu à la production des livrables finaux du marché. Elle inclut les présentations orales associées et la participation au COPIL sécurité.

Conformément au périmètre arrêté en début de marché, les livrables du présent marché sont les suivants :

1. **Les préconisations à destination de l'emprunteur (British Museum) et de son prestataire de transport**, formalisées à l'issue de la Phase 2 et consolidées dans le présent rapport : plan précis du parcours aller-retour avec protocole de conduite, signalement des accidents et particularités de l'itinéraire, itinéraire de repli, préconisations spécifiques

2. **Les spécifications techniques de la caisse internationale définitive**, formalisées à l'issue de la Phase 2 : systèmes d'amortissement adaptés à la Tapisserie sur son support de transfert (typologie, nombre, emplacement), systèmes de mesure et d'enregistrement climatique et physique en transport, solutions de contrôle climatique interne sur la durée du trajet, moyens de sécurisation de la caisse.
3. **La caisse internationale définitive elle-même** — antivibratoire, climatique et sécurisée — fabriquée selon les spécifications ci-dessus et fournie au pouvoir adjudicateur.
4. **Le présent rapport de synthèse**, exposant les résultats des essais, l'analyse des données vibratoires et climatiques, les protocoles validés et l'ensemble des préconisations.
5. **Les présentations orales du rapport et des préconisations** ainsi que la participation aux instances de pilotage : équipe projet France, équipe projet binationale au British Museum (comité technique), Comité de pilotage (COPIL) diplomatique, et COPIL sécurité (Phases 2 et 3).

1.1. Tapisserie de Bayeux

La Tapisserie de Bayeux est une broderie narrative monumentale, et non une tapisserie tissée. Cette distinction terminologique et technique est fondamentale au regard des contraintes de conservation et de transport : le décor est obtenu par broderie polychrome au fil de laine sur un support de toile de lin, et non par entrelacement de fils de chaîne et de trame. Elle est datée de la fin du XI^e siècle ou du début du XII^e siècle (CCTP, art. 3.1), et figure la conquête normande de

l'Angleterre par Guillaume le Conquérant en 1066. Saisie à la Révolution alors qu'elle figurait parmi les biens de la cathédrale Notre-Dame de Bayeux, elle est propriété de l'État, qui en a confié la garde à la Ville de Bayeux en 1804 ; la convention du 20 décembre 2017 acte son dépôt par l'État à la Ville, au sein des collections du Musée d'art et d'histoire Baron Gérard – Tapisserie de Bayeux, qui bénéficie de l'appellation Musée de France depuis cette même date.

Sur le plan du statut juridique et patrimonial, l'œuvre est le premier objet mobilier classé au titre des monuments historiques, sur la liste fondatrice de 1840. Elle est par ailleurs inscrite au registre Mémoire du monde de l'UNESCO depuis 2007, en tant qu'« œuvre vulnérable » et « source documentaire unique au Monde ».

Du point de vue de la constitution matérielle, le support est une toile de lin tissée en armure toile, formée de neuf lés cousus bout à bout sur la longueur de l'œuvre. Le décor est réalisé par broderie au fil de laine, mettant en œuvre principalement deux techniques : le point de tige, employé pour les contours des figures et pour les inscriptions latines (titulus) ; et le point couché dit de Bayeux (variante du laid and couched work), employé pour le remplissage des surfaces colorées. La palette comporte une dizaine de teintes obtenues par teintures végétales — principalement garance (rouges), guède ou pastel (bleus), gaude (jaunes) — et leurs nuances combinées. La composition se déploie sur trois registres horizontaux : un registre narratif central, qui porte le récit principal et les titulus, encadré d'une frise supérieure et d'une frise inférieure également brodées, peuplées de figures animales, fantastiques et de scènes annexes.

S'agissant des dimensions, la longueur totale est rapportée par les sources publiques de référence avec de légères variations : 68,80 m selon le dossier d'inscription UNESCO et 68,58 m selon les données de la Ville de Bayeux ; cet écart d'environ 22 cm reflète vraisemblablement des conventions de mesure différentes (prise en compte ou non des marges, des extrémités restaurées, du doublage). Le CCTP retient pour sa part la valeur arrondie de 70 m (CCTP, art. 3.1), conforme à l'usage courant. Pour les besoins du présent rapport, la valeur retenue est de 68 m, cohérente avec les sources publiées et appropriée à la précision requise pour les calculs de transport. La hauteur totale du support textile est d'environ 70 cm (0,70 m, CCTP, art. 3.1), dont une zone brodée d'environ 50 cm de hauteur comprenant les trois registres, le complément correspondant à des marges de toile non brodée. La masse totale de l'ensemble (toile originale et doublage de support) a été mesurée à environ 50 kg lors de l'extraction de l'œuvre conduite en septembre 2025, dans le cadre des opérations préparatoires au déplacement vers la réserve dédiée.

L'œuvre se présente aujourd'hui dans une configuration composite : la toile de lin originale est solidaire d'un doublage de support textile rapporté, mis en place et révisé au cours des interventions historiques des XIX^e et XX^e siècles, et constitutif désormais d'un élément structurel à part entière. Cette stratification (toile originale + doublage) modifie le comportement

mécanique global de l'objet — raideur en flexion, distribution des contraintes lors de l'enroulement et du transfert sur le paravent, comportement modal sous sollicitation vibratoire — et doit être prise en compte comme telle pour la définition des dispositifs de protection. Conformément à l'art. 3.1 du CCTP, la broderie n'a à ce jour pas fait l'objet d'opérations de conservation-restauration au sens contemporain du terme : les interventions historiques de doublage et de fixation ne préjugent pas d'une restauration de la matière brodée. Le comité scientifique s'est prononcé en faveur d'une restauration préalable à tout déplacement, position que le calendrier du prêt n'a pas permis de suivre.

Le dernier changement de lieu d'exposition est intervenu en 1982-1983, l'œuvre passant d'une présentation verticale courbe concave en local non climatisé à une présentation verticale courbe convexe en vitrine intégrée à un local technique climatisé. Le système d'accrochage, initialement réalisé par clouage sur panneaux de bois, a été remplacé à cette occasion par un dossier technique équipé de crochets coulissants sur rail, auquel la broderie est solidarisée. Lors des opérations préparatoires de 2024-2025, ce dossier a été retiré à l'exception d'une bande supérieure assurant l'accrochage actuel, et un dépoussiérage face et revers a été conduit.

1.2. Limite de la réponse

1.2.1. Synthèse de « Étude de faisabilité du transport et du stockage de la Tapisserie de Bayeux » de 2022

Rappel scientifique (mécanismes d'altération)

L'étude rappelle que, sous l'effet de sollicitations mécaniques, des micro-dégradations (souvent invisibles) peuvent s'accumuler jusqu'à produire des macro-dégradations : affaiblissement structurel, déchirures, soulèvements, pertes de matière, etc. Deux familles de sollicitations sont distinguées :

- Chocs (événements brefs : chute, collision, impact) pouvant dépasser un seuil critique et générer des dommages immédiats.
- Vibrations (contraintes cycliques) pouvant provoquer des dommages par fatigue même à des niveaux faibles, du fait de la répétition dans le temps (dépendance amplitude/fréquence/durée).

Enfin, l'étude souligne que ces phénomènes mécaniques sont aggravés par un climat non contrôlé et fluctuant (température / humidité relative), car les réponses hygromécaniques peuvent être irréversibles.

Risques principaux identifiés (transport longue distance)

- a) Risques vibratoires et de chocs sur l'ensemble de la chaîne de manutention/transport
Toute manipulation (manuelle ou mécanisée), franchissement de seuils, mouvements de

véhicule génèrent des vibrations ; chaque étape doit être planifiée pour limiter les effets. Les facteurs de risque majeurs cités incluent : encombrement/masse de la caisse (risque de chute, manutention difficile), et ruptures de charge (portes, couloirs, monte-charge, chargement/déchargement) multipliant les probabilités de choc/vibration liés à une erreur ou à un sol non amorti.

- b) Risques climatiques (température et humidité relative) : La Tapisserie est décrite comme particulièrement sensible aux variations climatiques (fragilité mécanique combiné à un comportement hygroscopique) ; l'étude préconise un environnement stable via caisse super-isotherme et camion climatisé avec contrôle continu.
- c) Risques spécifiques aux transports internationaux (logistique/douanes/sécurité) : Le scénario "idéal" présenté vise une mise en caisse au musée puis une caisse qui ne doit plus être ouverte, notamment pour des raisons de conformité douanière et de maîtrise des risques.

S'ajoutent des exigences de sûreté (surveillance permanente, étape nocturne en dépôt sécurisé climatisé) et la continuité des moyens (même camion/chauffeurs), avec une préférence exprimée pour un trajet France – Royaume-Uni [REDACTED] afin de limiter les ruptures de charge.

- d) Risques inhérents au support de transfert. Même optimisé, il est rappelé que le support de transfert initial a été prévu pour du déplacement interne / courte distance. Il est insuffisant "en l'état" pour un transfrontalier : des adaptations sont requises.

Les risques mécaniques cités portent sur : tensions horizontales, tensions verticales (liées à la suspension et pouvant être amplifiées par vibrations), et cisaillement/torsion si les panneaux ne sont pas fortement solidarisés.

Mesures de réduction de risque proposées

L'étude propose une approche "multi-barrières" combinant :

- Protection climatique (caisse super-isotherme, suivi T/HR).
- Atténuation vibrations (solutions passives en caisse et suspensions camion), avec un objectif formulé dans le document : en caisse, dans 1–100 Hz, limiter l'exposition du support de transfert à une amplitude définie (référence donnée dans l'étude) et instrumenter par accéléromètres.
- Protection contre les chocs.
- Instrumentation pour vérifier l'efficacité (T/HR, chocs, vibrations).

1.2.2. Rappel des contraintes des 2 mm/s

Au cours des réunions tenues dans le cadre de ce marché, la DRAC a fait référence à l'article suivant : Wei, William, Leila Sauvage, Jenny Wölk, and Janet Bridgland (Book Editor). "Baseline Limits for Allowable Vibrations for Objects." In *ICOM-CC 17th Triennial Conference Preprints, Melbourne, 15-19 September 2014*. ICOM Committee for Conservation, 2014.

Leila Sauvage, membre de SMACH, est l'un des co-auteurs de cet article scientifique. Dans le cadre de cette étude, il apparaît nécessaire de clarifier certains points techniques et scientifiques importants. Cela répond aux différents questionnements de la DRAC.

Pourquoi le seuil de "2 mm/s" seul n'est pas applicable (vitesse vs accélération)

Il y a souvent une confusion entre la vitesse de vibration (mesurée en mm/s) et l'accélération (mesurée en "g", ou en m/s^2).

Pour faire une analogie simple : la vitesse, c'est l'allure à laquelle vous roulez, et l'accélération (les "g"), c'est la violence avec laquelle vous freinez ou accélérez. Ce sont les "g" qui provoquent un choc mécanique.

En physique, si un objet vibre lentement d'avant en arrière à une vitesse de 2 mm/s, la force (les "g") est très faible. En revanche, si ce même objet vibre d'avant en arrière extrêmement vite (ce qu'on appelle les hautes fréquences), tout en gardant cette même vitesse de 2 mm/s, les changements de direction sont si brusques que la force encaissée par l'objet devient énorme.

Ainsi, une vibration peut avoir une vitesse apparemment "sûre" de 2 mm/s, mais générer en même temps une force d'accélération dangereuse de plus de 0,2 g ou même 0,6 g selon la fréquence. C'est pourquoi fixer uniquement une limite de 2 mm/s n'a pas de sens d'un point de vue scientifique pour protéger l'œuvre : il faut absolument définir ces limites en prenant en compte la force (souvent caractérisée par des "g") sur l'ensemble des fréquences.

En outre, nous souhaitons rappeler un certain nombre d'éléments qui montrent que le seuil de 2mm/s ne peut pas être appliqué à tous les cas.

Une limite générique

Ce seuil de 2 mm/s a été proposé par les auteurs comme une "ligne de défense de base", principalement pour protéger des collections de musées lors de travaux de construction dans le bâtiment, concerts au sein des musées, et transport d'œuvres de type peintures, pastels et sculptures. D'ailleurs, les auteurs eux-mêmes précisent dans leurs travaux de 2022 que ce seuil est proposé « dans l'attente de recherches plus approfondies ».

Des matériaux testés incomparables (et souvent récents)

Pour établir ces seuils, les chercheurs ont fait des tests sur des échantillons fabriqués récemment pour simuler des œuvres, notamment des peintures au pastel, ou des peintures sur toile du XXe siècle. Il paraît difficile voire incorrect d'appliquer ce seuil à un textile en lin et laine du XIe siècle. Les fibres de la Tapisserie ont près de 1 000 ans ; elles ont subi un vieillissement chimique et mécanique qui les rend infiniment plus vulnérables à la fatigue (la rupture à force d'être pliées ou étirées) que n'importe quel objet classique de musée. Afin de définir un seuil pertinent pour la Tapisserie, il serait nécessaire de mener une recherche interdisciplinaire approfondie, afin de comprendre ses mécanismes de fatigue, de simuler sa réaction à différents milieux vibratoires (et donc différentes fréquences), d'estimer l'état mécanique des différentes fibres selon leur emplacement, etc. Cette étude n'est à ce stade pas disponible et ne fait pas partie du présent marché.

Le comportement d'un textile de 70 mètres de long

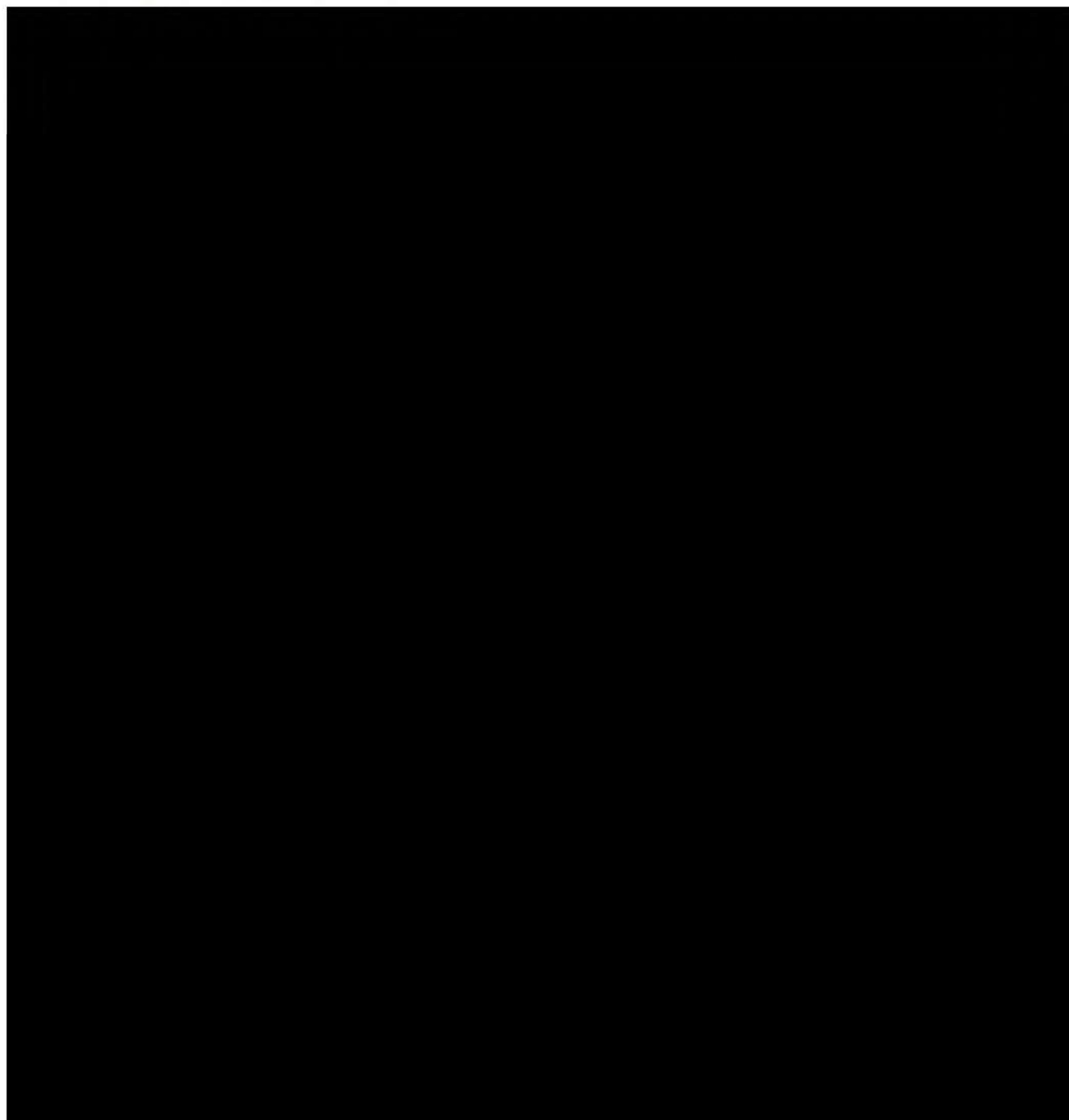
Les seuils de cet article de l'ICOM-CC sont pensés pour des objets isolés ou rigides (une toile sur un cadre, une sculpture, etc.). La Tapisserie de Bayeux est un textile souple de 70 mètres de long. Face à une vibration, une œuvre d'une telle longueur ne réagit pas de manière uniforme : la vibration peut se propager sous forme d'ondes, ricocher, et s'amplifier à certains endroits précis du tissu (les fameuses amplifications dont nous avons parlé). Un seuil unique de 2 mm/s ne tient pas compte de cette mécanique complexe.

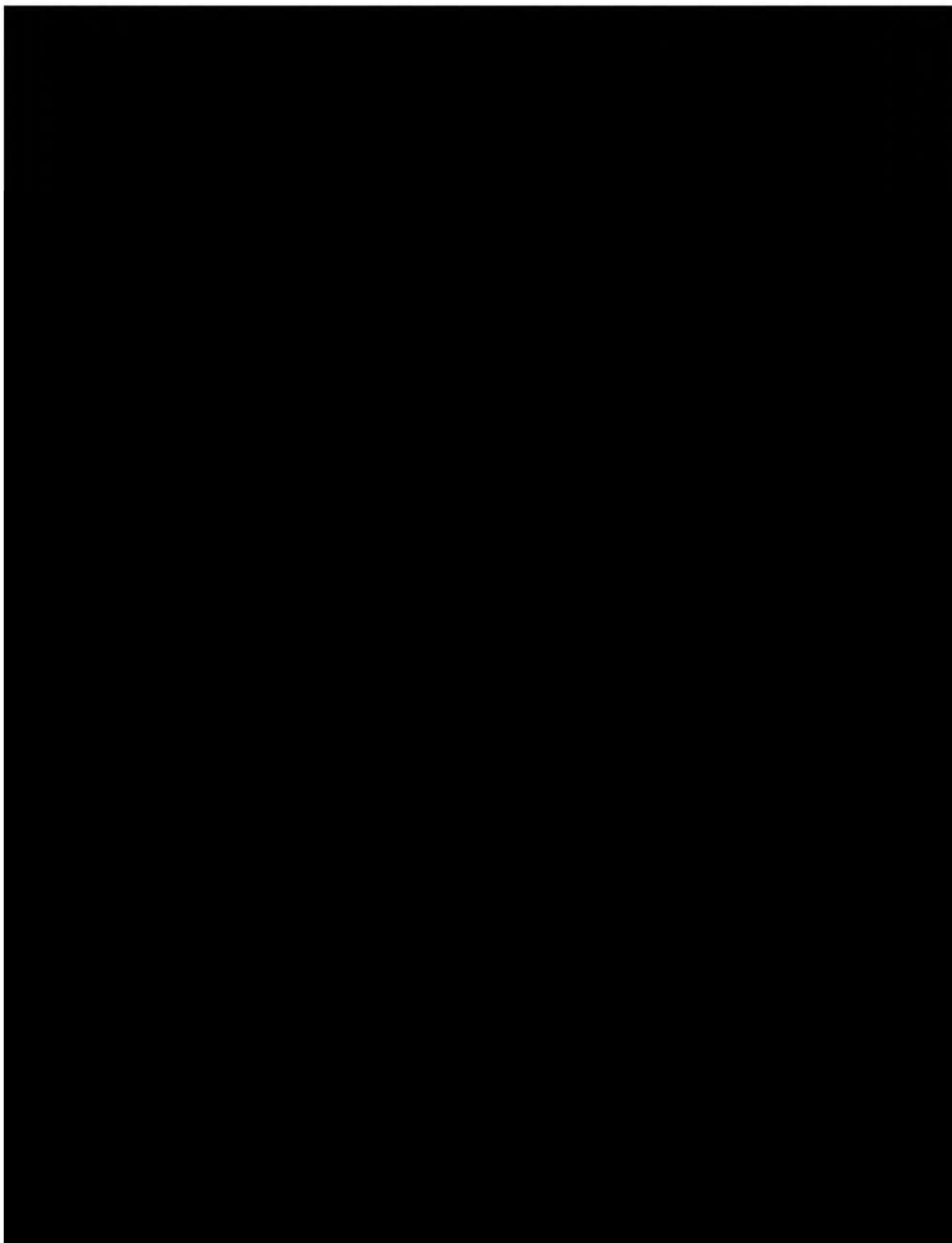
Comme nous vous l'expliquions précédemment, le chiffre de 2 mm/s correspond uniquement à une vitesse de vibration. Mais à haute fréquence, une vibration de 2 mm/s génère des chocs d'accélération (des "g") extrêmement violents. Appliquer systématiquement cette règle de 2 mm/s risquerait de laisser passer des vibrations à hautes fréquences qui viendraient littéralement cisailer les fibres fatiguées de la Tapisserie.

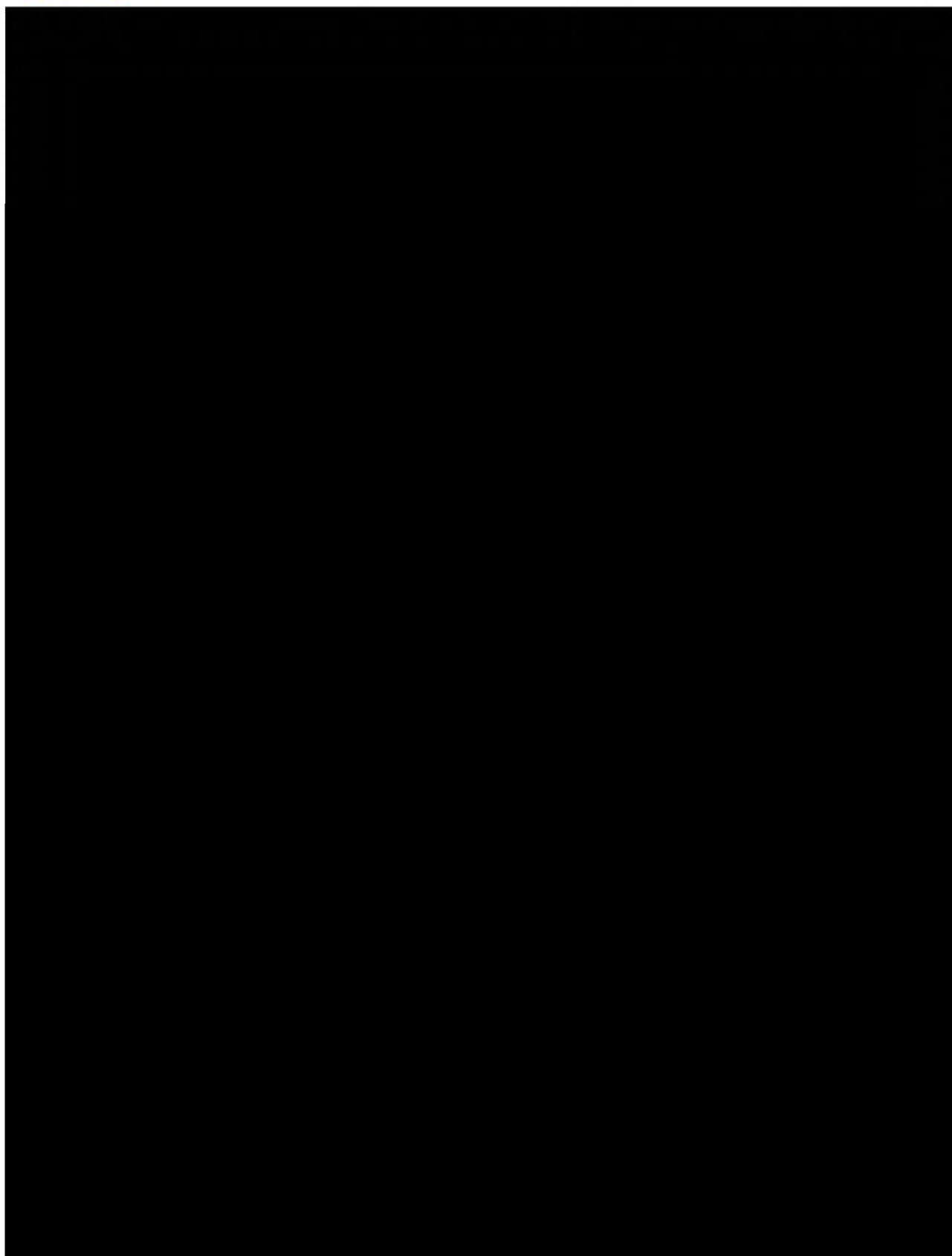
Sur l'atténuation au-delà de 200 Hz

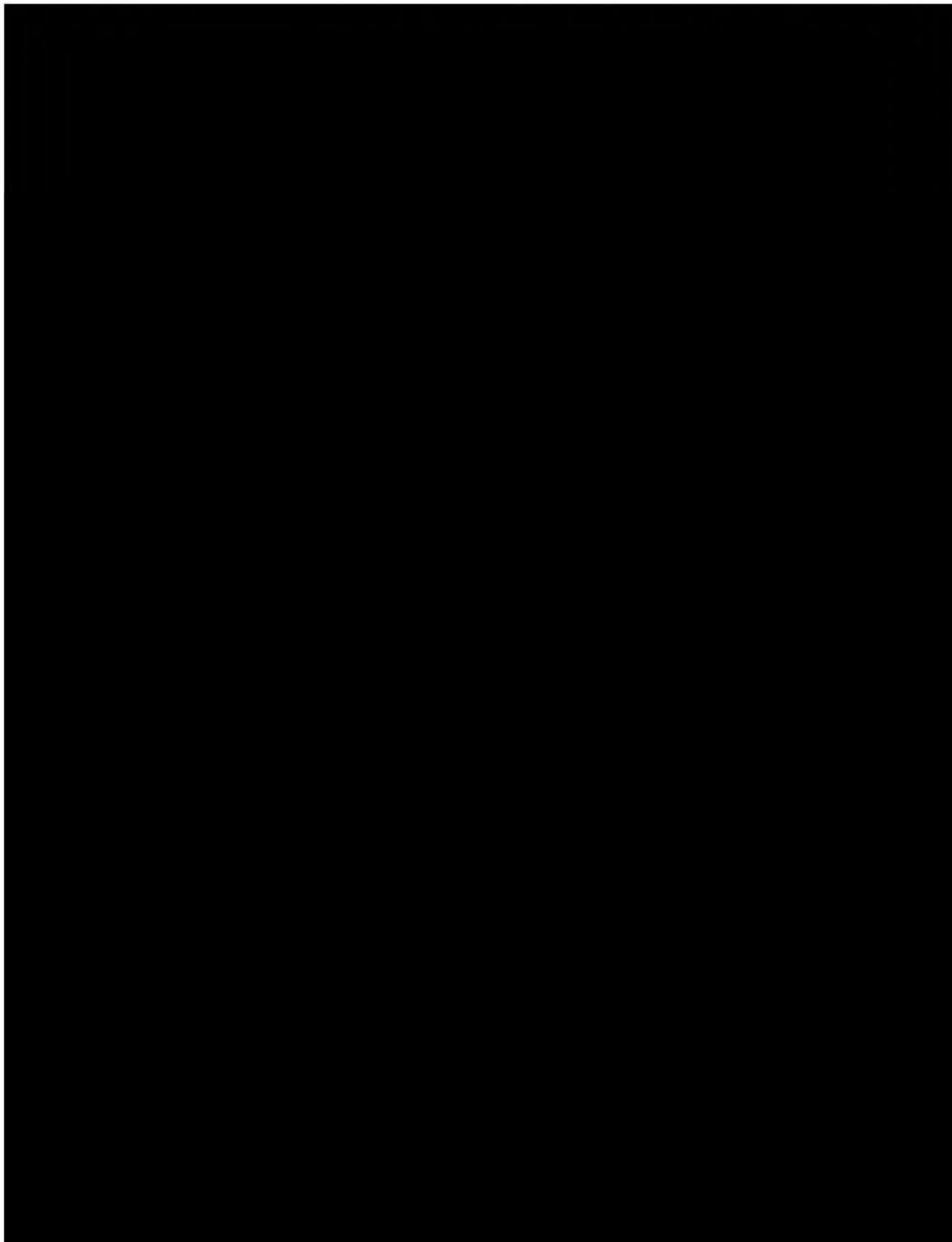
Les fréquences critiques sont les fréquences d'accord mentionnées plus haut. Les vibrations résiduelles mesurées sur le cadre intérieur lors de l'essai en découlent. Les camions sont conçus de manière à ce que l'excitation des marchandises transportées au-dessus de 200 Hz soit très faible ; il ne s'agit que d'un bruit de fond, et donc négligeable. En outre, conformément à l'ASTM D4169, les vibrations devraient être surveillées jusqu'à 200 Hz.

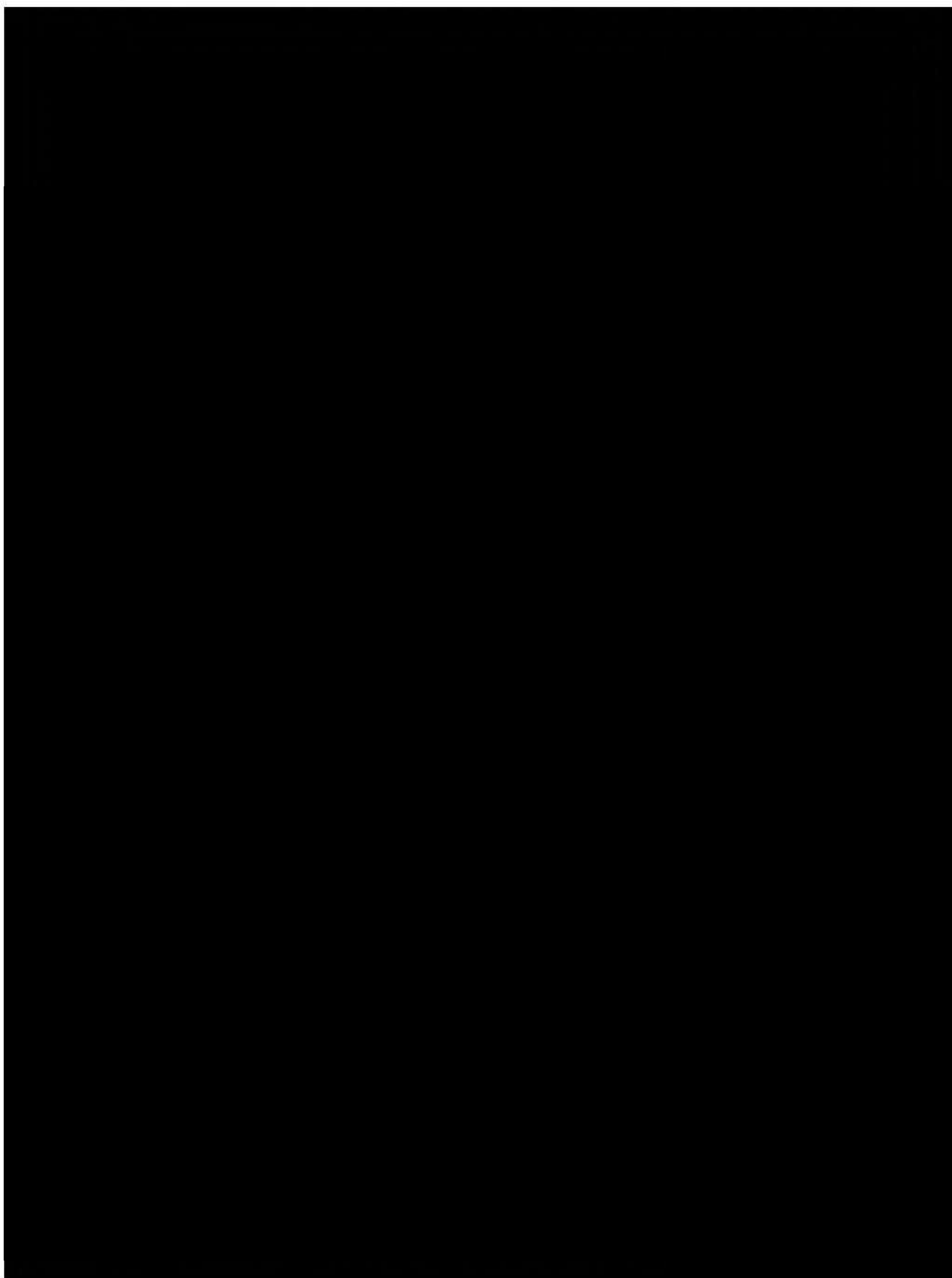
2. Logistique du transport

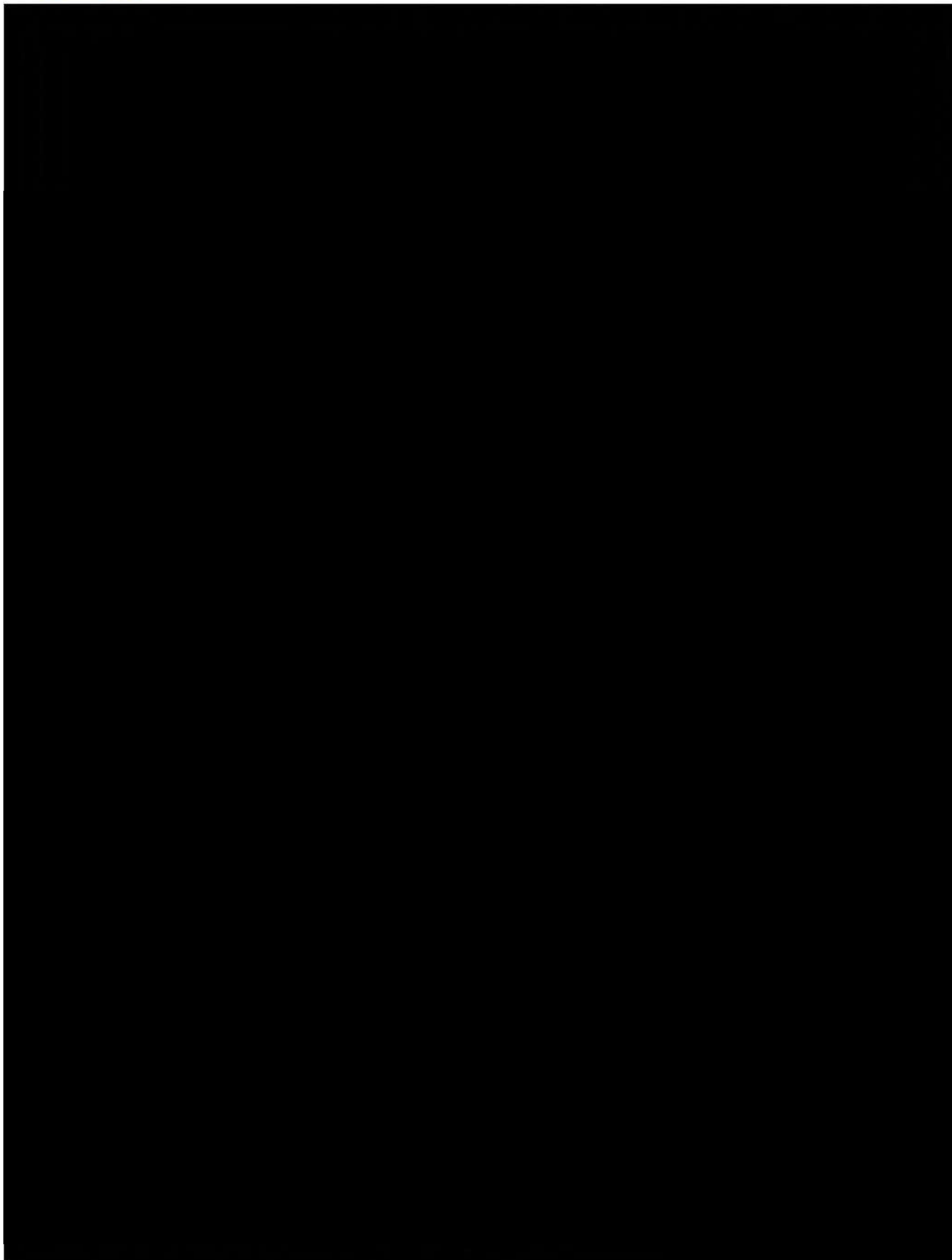












2.2. Caractéristique du camion de transport

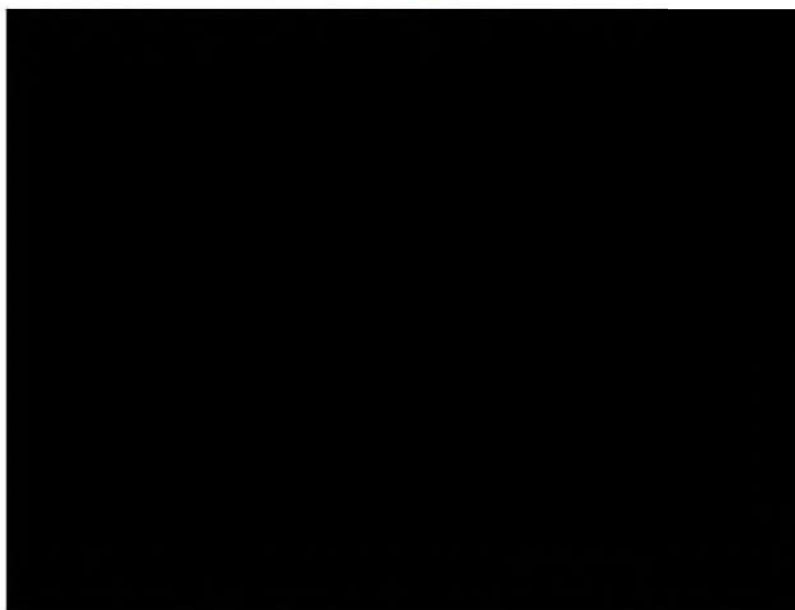


Figure 7 : Camion de transport HIZKIA Fine Art pour les œuvres d'art fragiles. ©HIZKIA

Le camion HIZKIA Fine Art est un Mercedes-Benz Actros V 1840 doté d'une cabine de conduite spacieuse et d'un siège homologué pour un convoyeur.

Il est équipé d'une suspension pneumatique AIRMATIC sur les essieux avant et arrière pour une conduite réactive et un contrôle optimal des vibrations.

Le camion dispose de deux systèmes GPS distincts combinant les technologies GNSS et LTE/GPRS (Lommy Fleet Tracker et un GPS relié directement à la société d'alarme Securitas).

Nous travaillons actuellement sur une solution pour permettre aux forces de l'ordre d'avoir accès directement à notre tracker pour suivre le camion en temps réel.

Le camion dispose également d'une alarme conducteur dans la cabine et d'une alarme séparée dans le compartiment de chargement.

Les portes arrière sont doubles et équipées de deux systèmes de verrouillage haute sécurité.

Ce camion répond à la norme Euro 6.

Le hayon élévateur hydraulique mesure 280 cm de long et est fixé sur charnières en position ouverte.

La carrosserie est construite et fixée directement au châssis grâce à des parois sandwich composées de deux couches revêtues d'acier et de 5 mm de mousse isolante XEPE sur les quatre côtés pour une sécurité, une isolation et une protection renforcées contre les incendies.

Les parois intérieures sont revêtues de tissu et équipées de panneaux d'arrimage en acier galvanisé pour la fixation des caisses aux parois et au plancher. Ce renfort en acier permet une meilleure absorption des vibrations.

Le compartiment de chargement est équipé d'un éclairage LED et d'une caméra reliée à la cabine.

Un compartiment technique séparé gère l'humidité et la température à l'intérieur du camion. Un enregistreur de données sur carte SIM surveille les opérations et transmet les données en temps réel au centre de contrôle opérationnel.

La température est régulée par un thermostat Thermo King UT.800R50.

L'humidité est contrôlée par des climatiseurs Condair CP3 et DA 210.

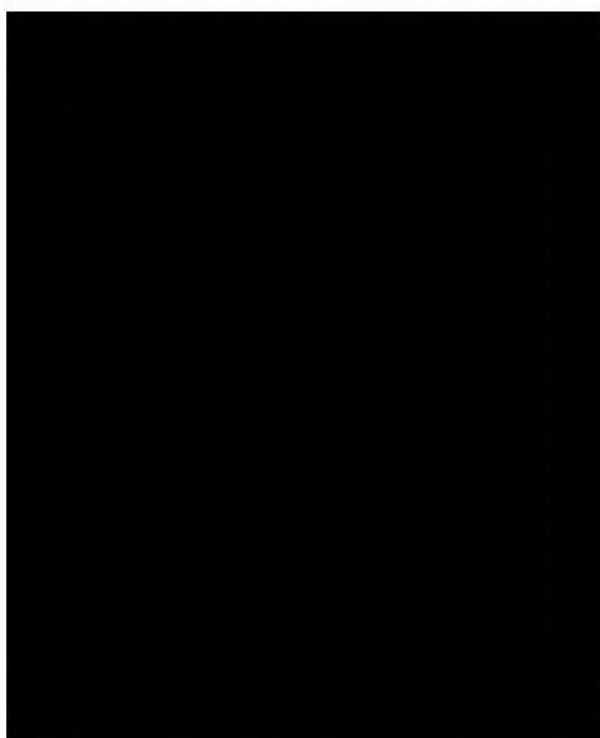
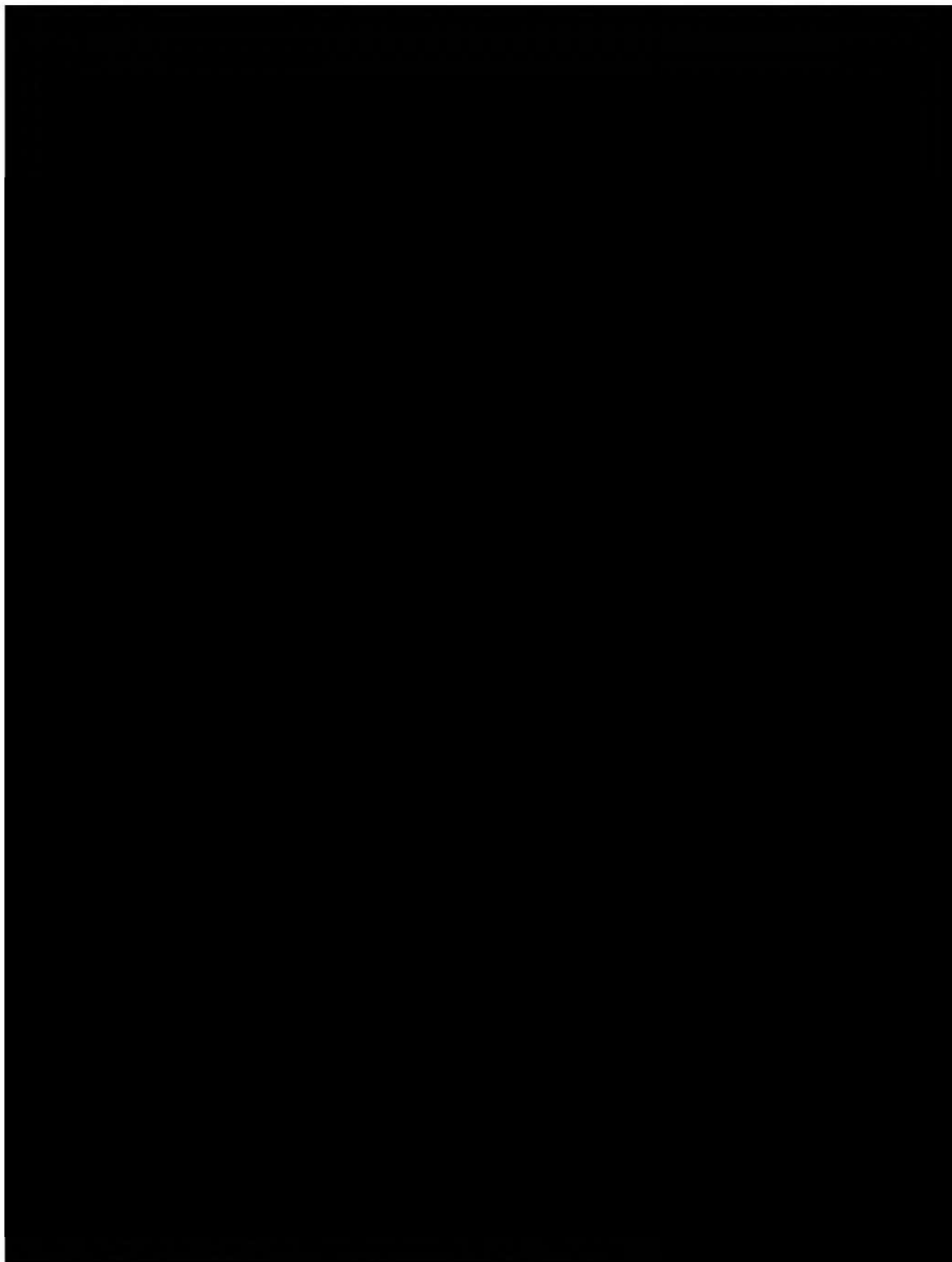
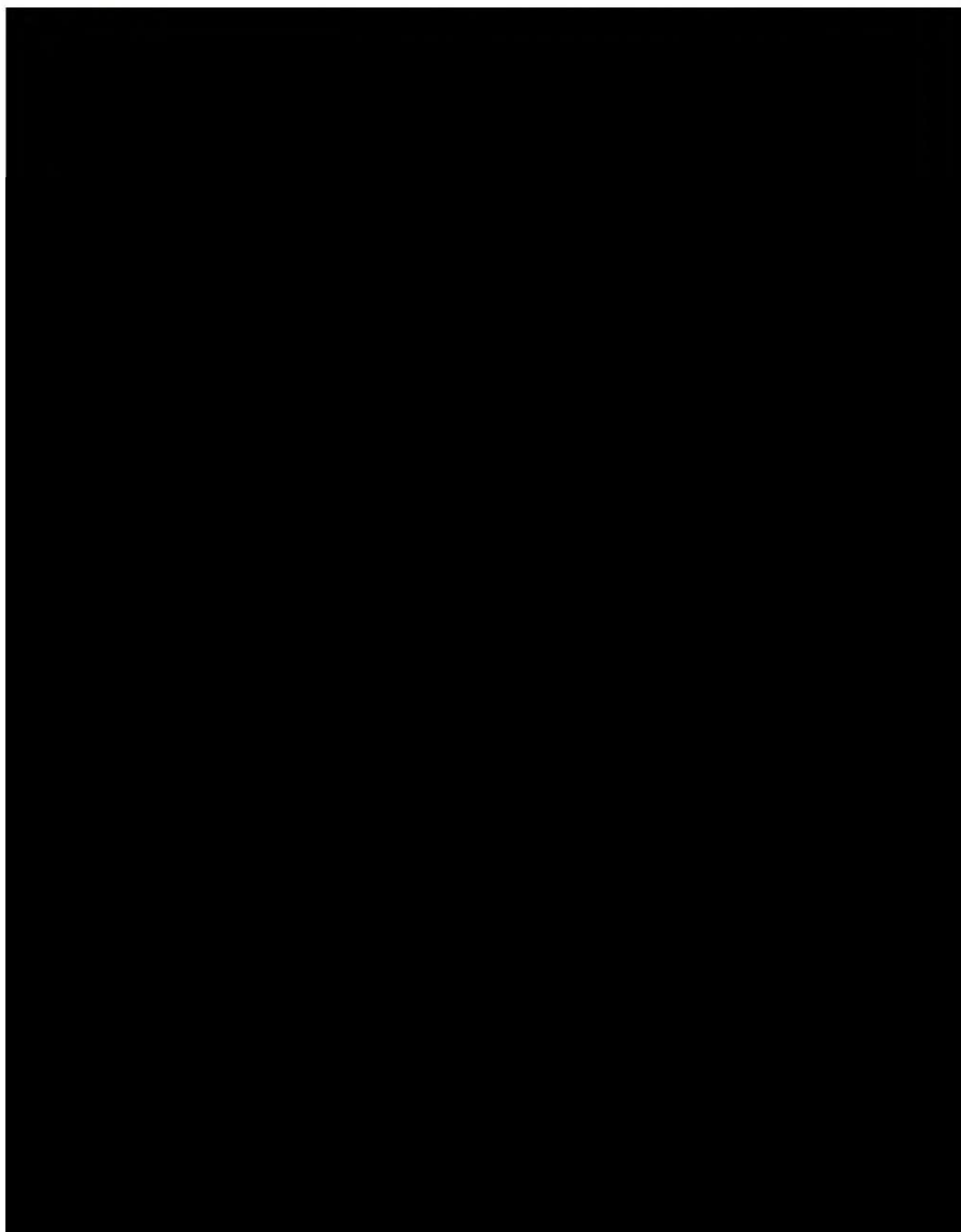


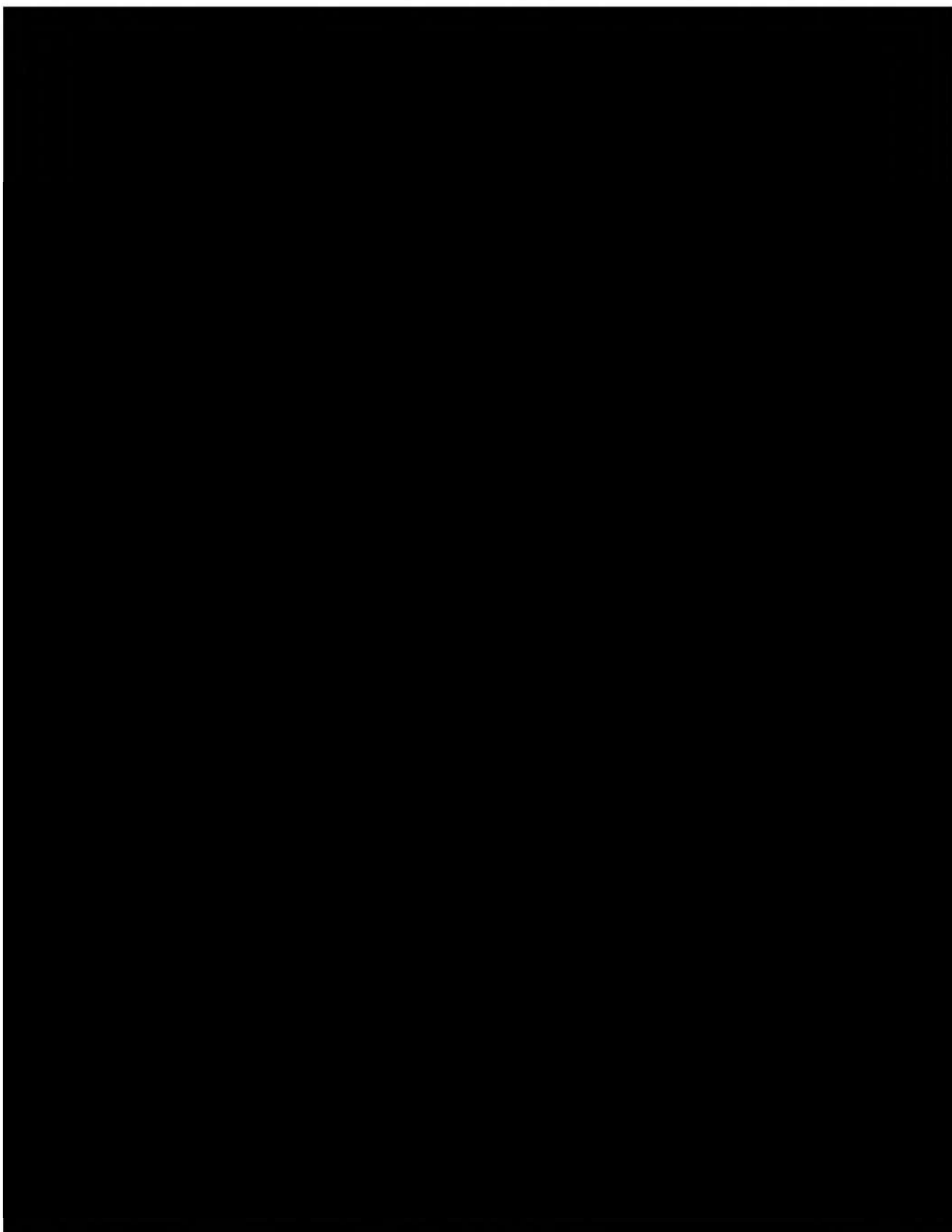
Figure 8 : Intérieur du camion HIZKIA Fine Art. ©HIZKIA

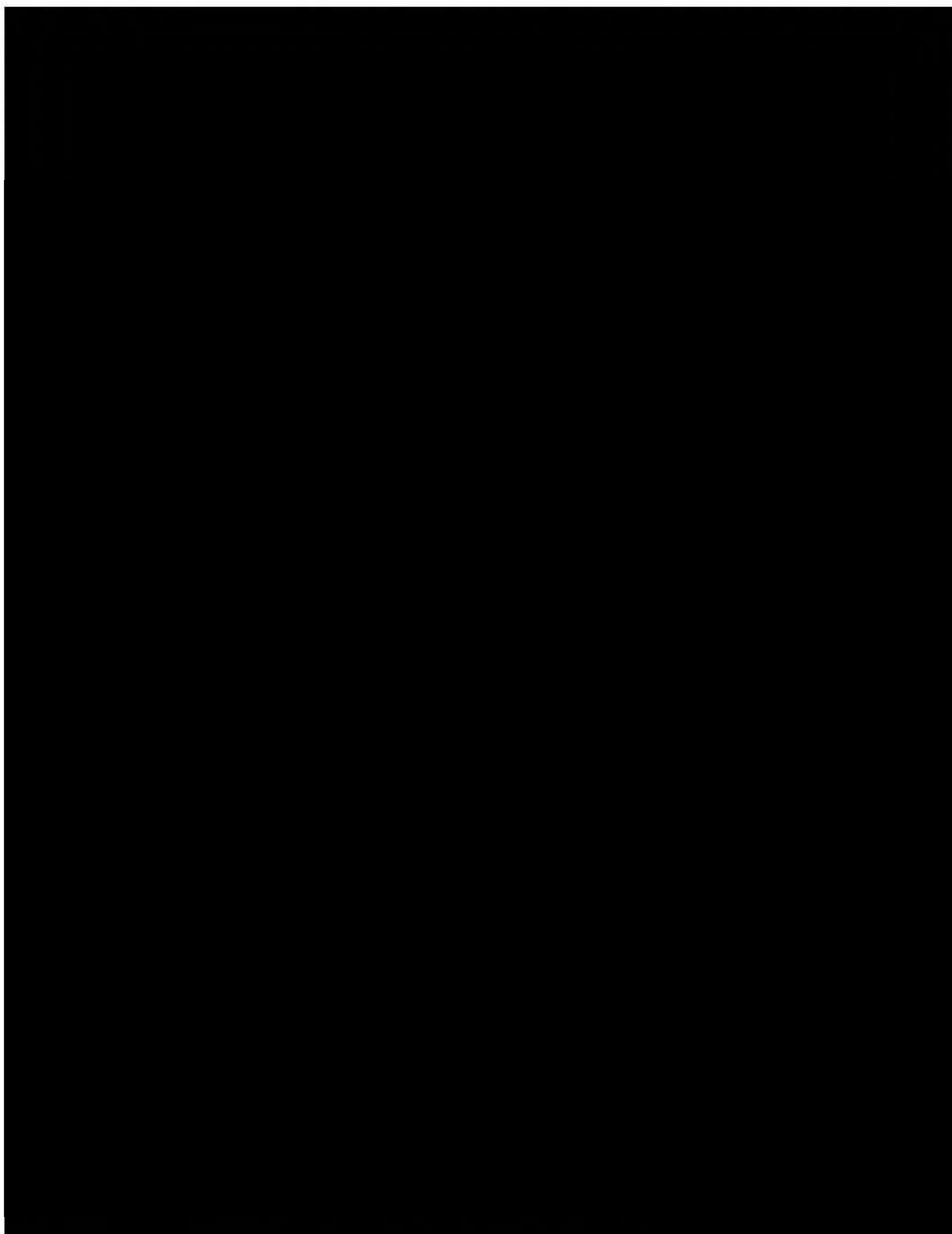
Ce camion fait partie de notre solution pour l'amortissement des vibrations et le maintien de l'œuvre dans un environnement stable en termes de température et d'hygrométrie au même titre que la caisse.

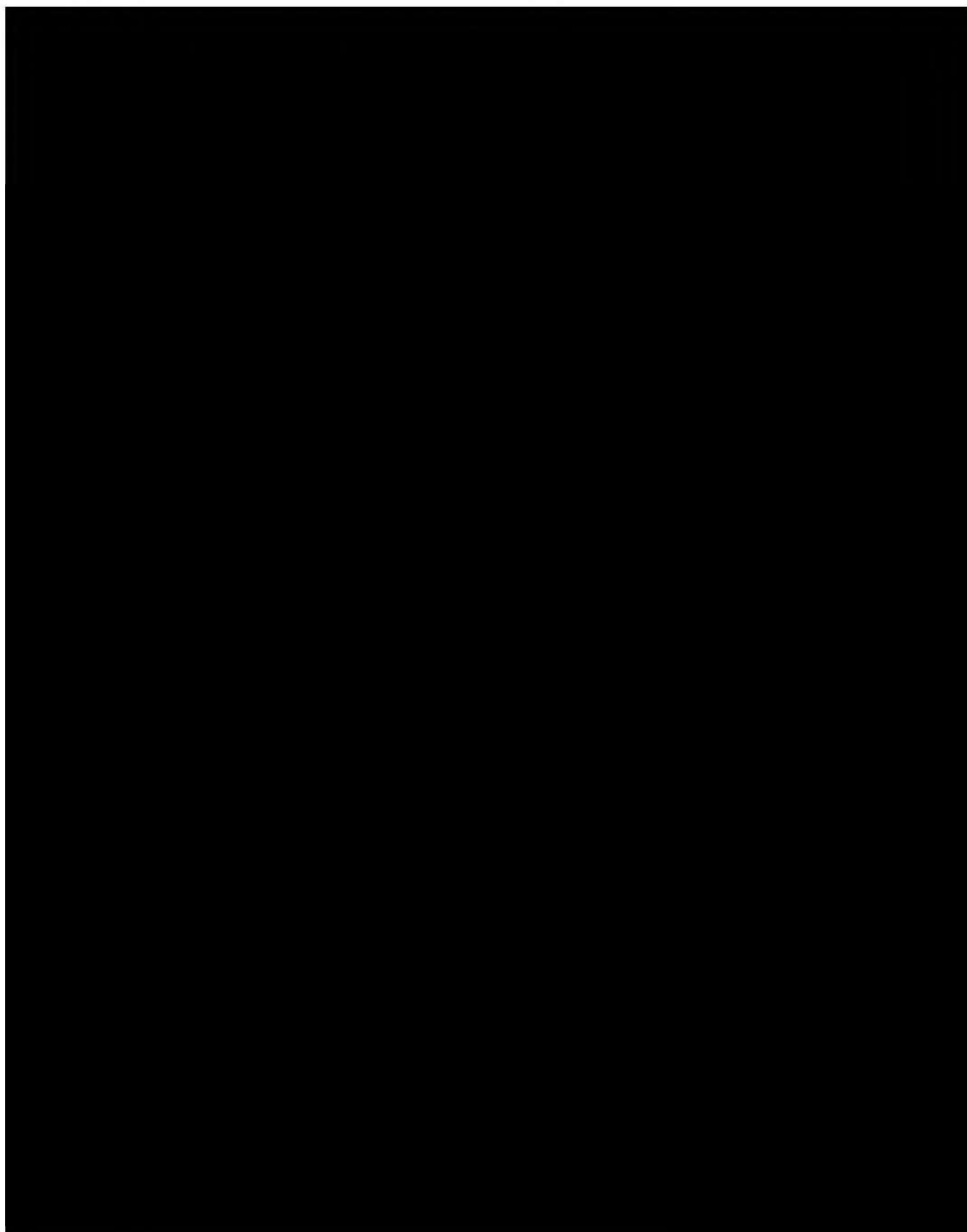
Pour ces raisons, nous préconisons absolument de se doter du même camion pour le transport de la Tapisserie de Bayeux.

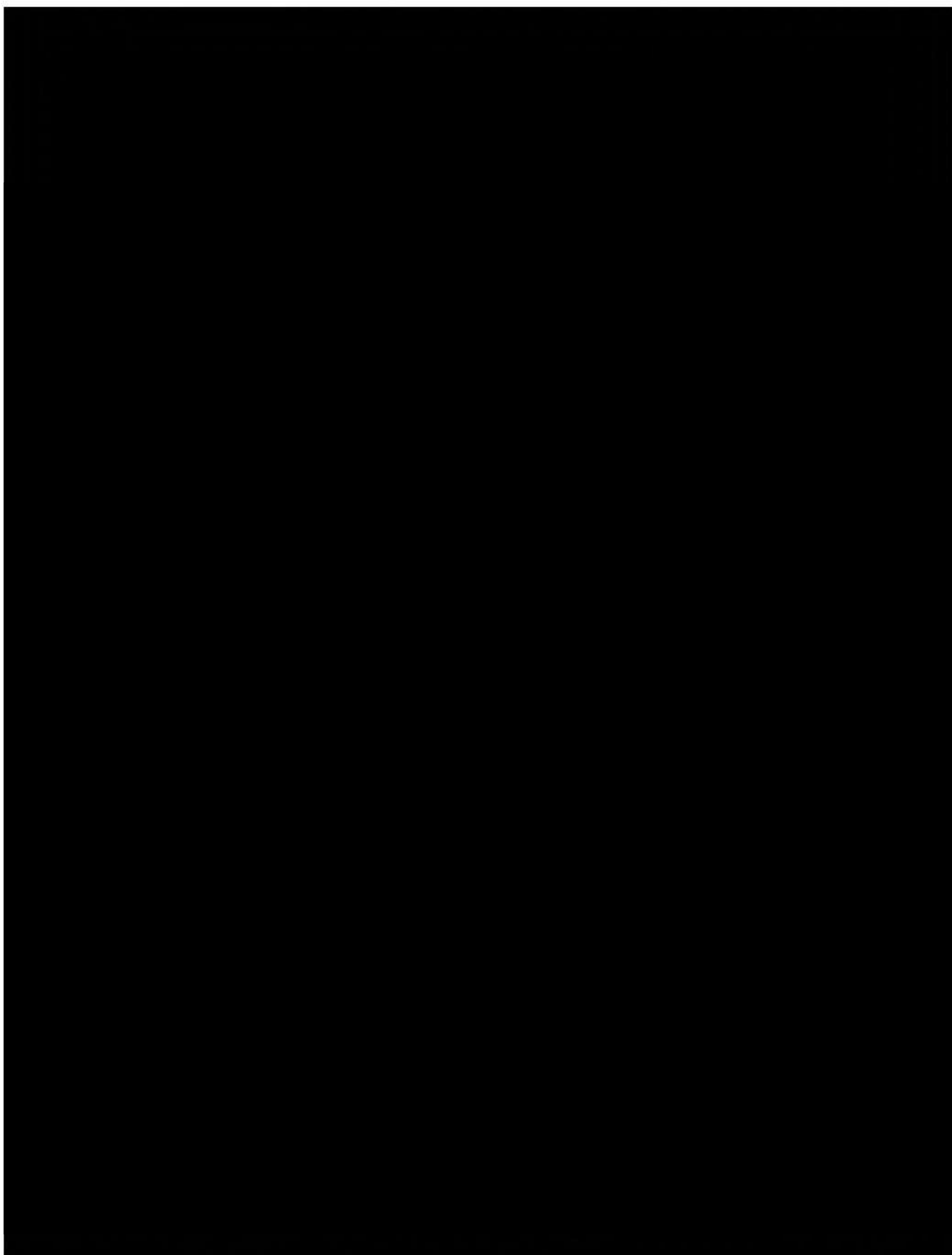


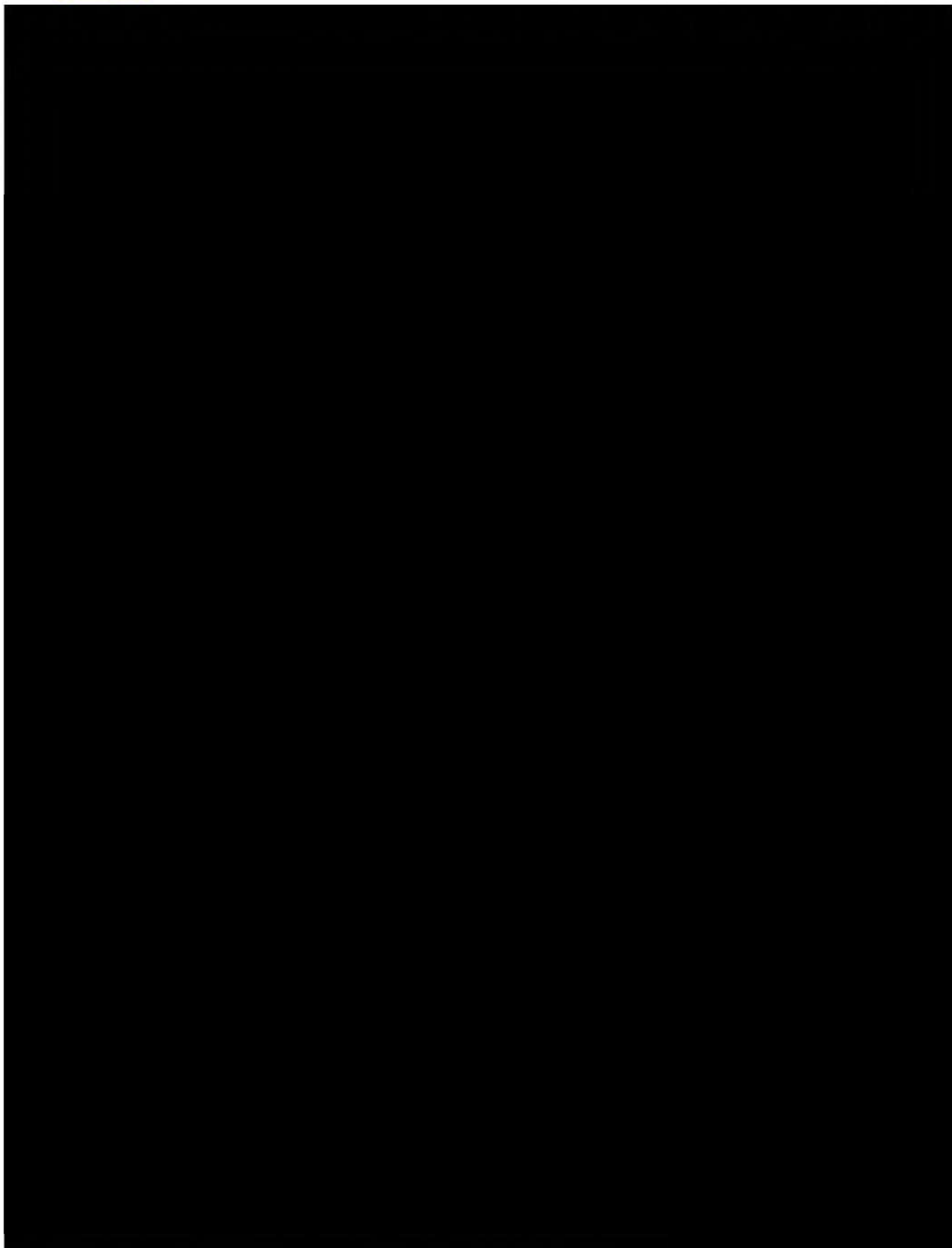


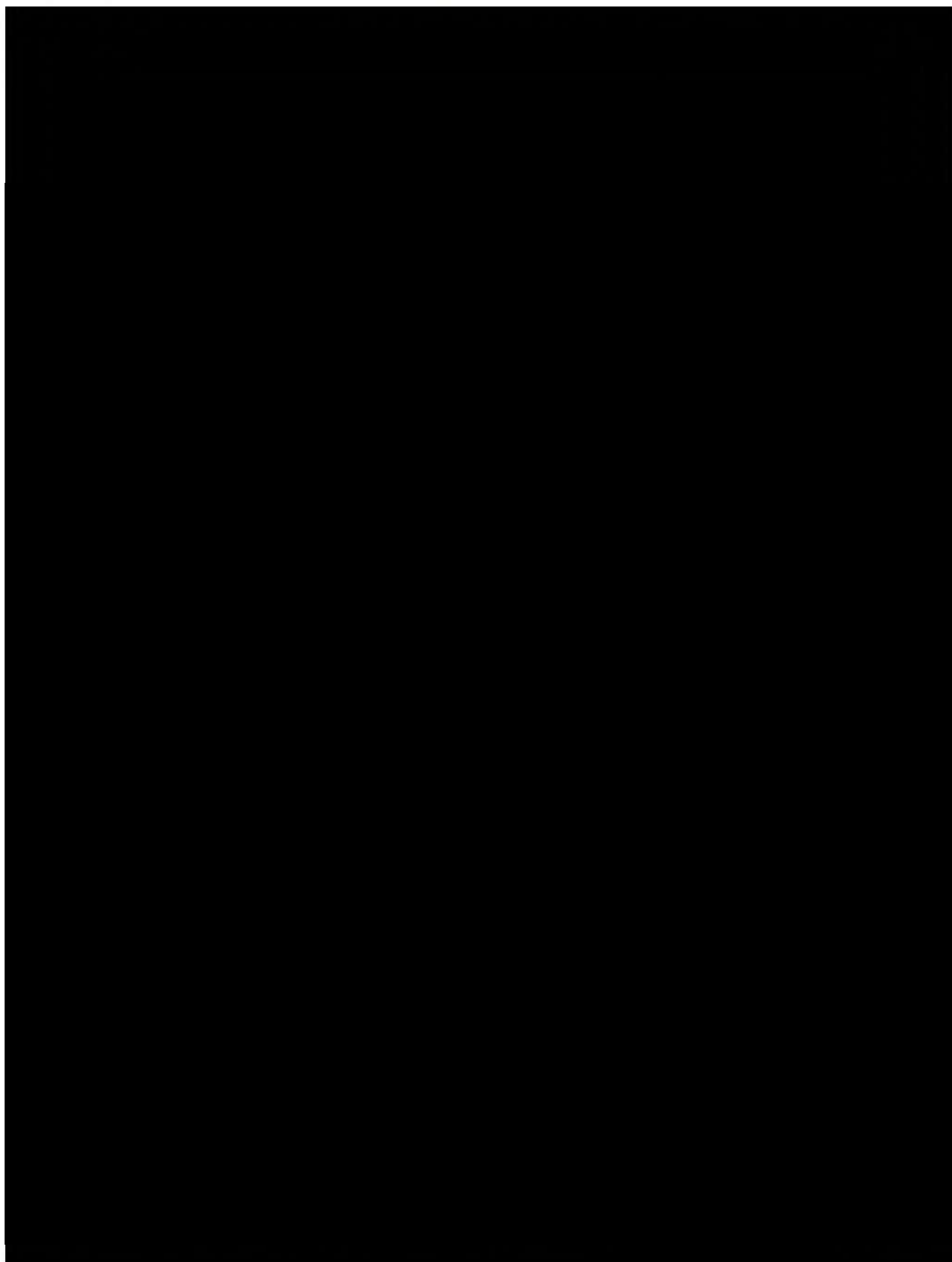


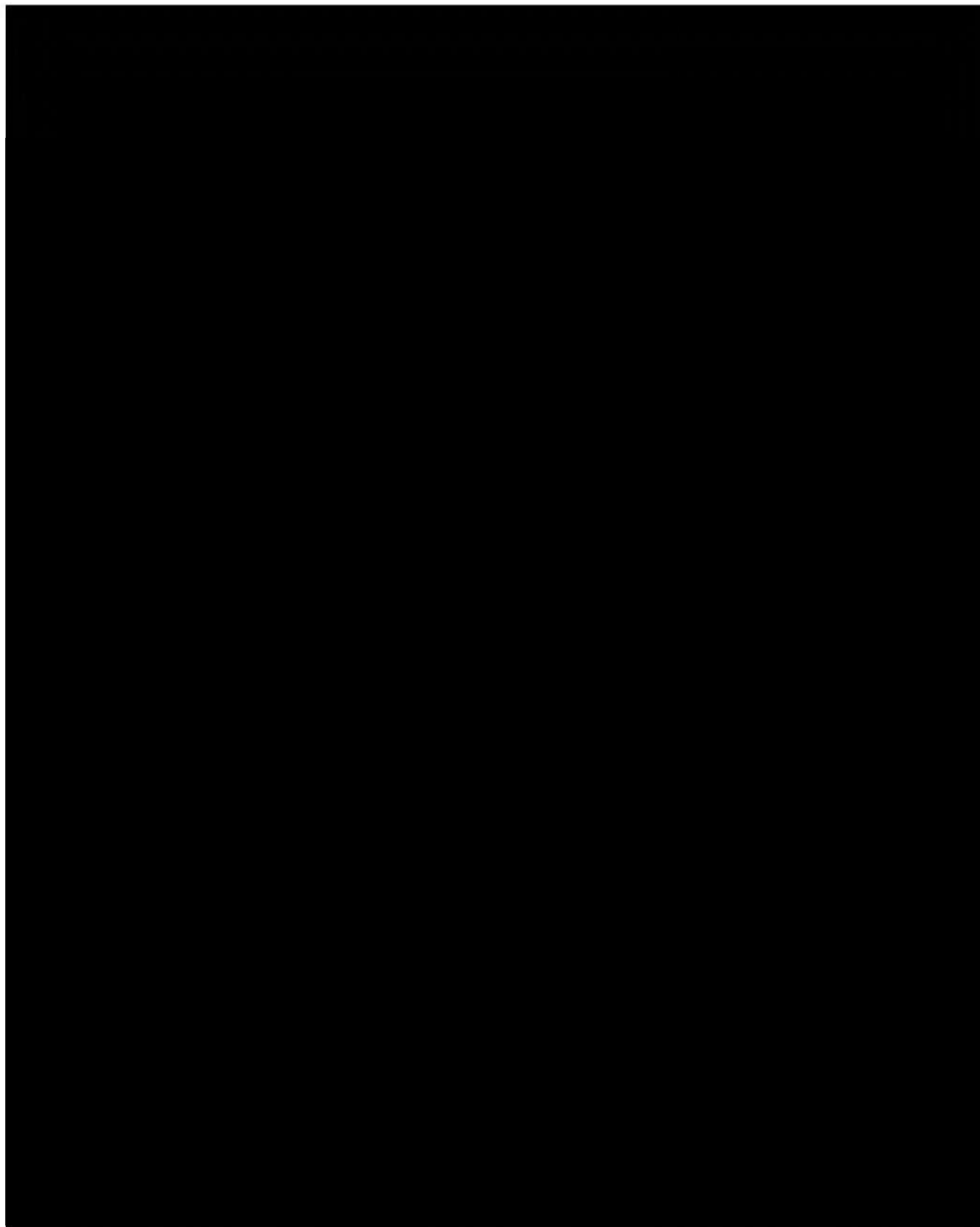


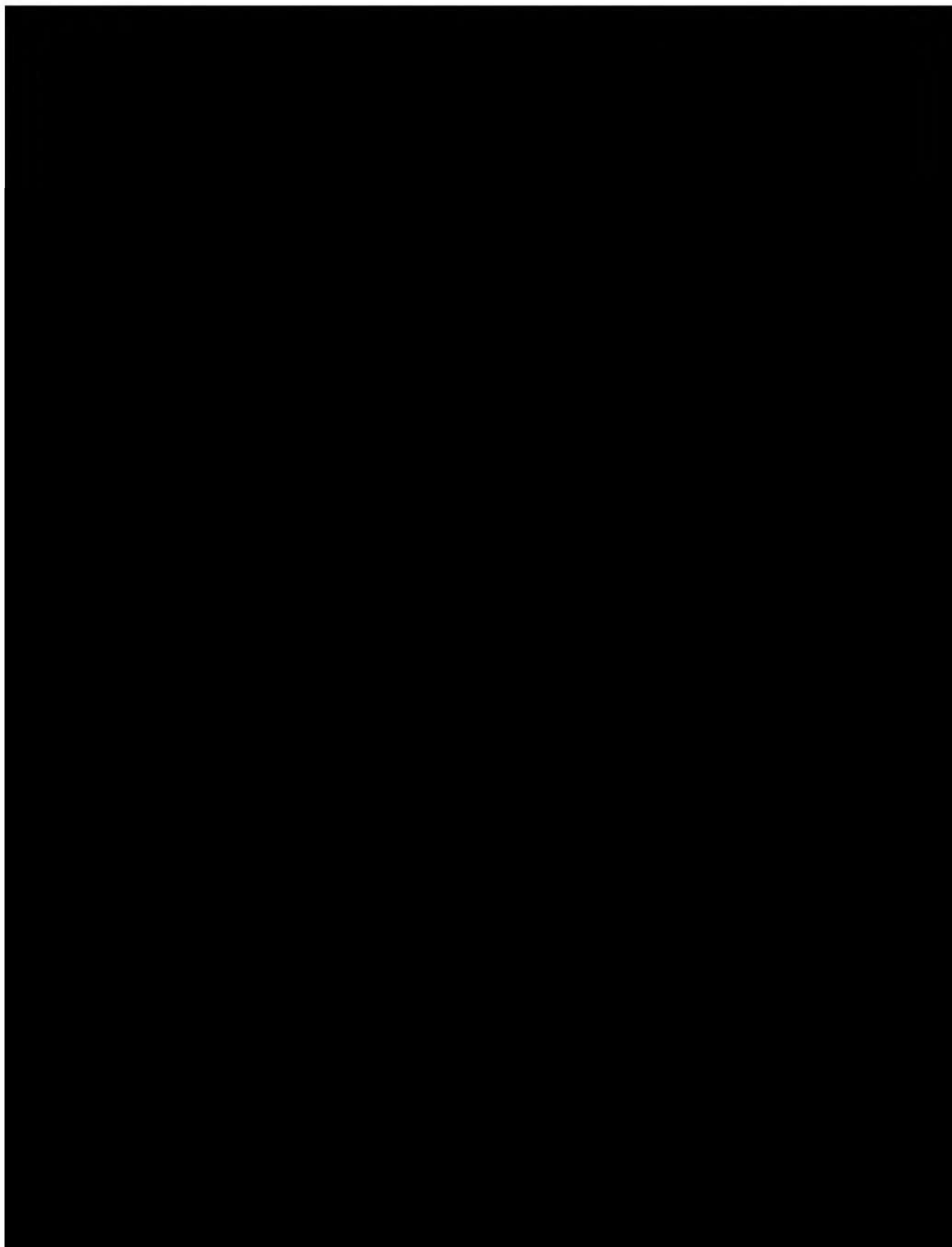


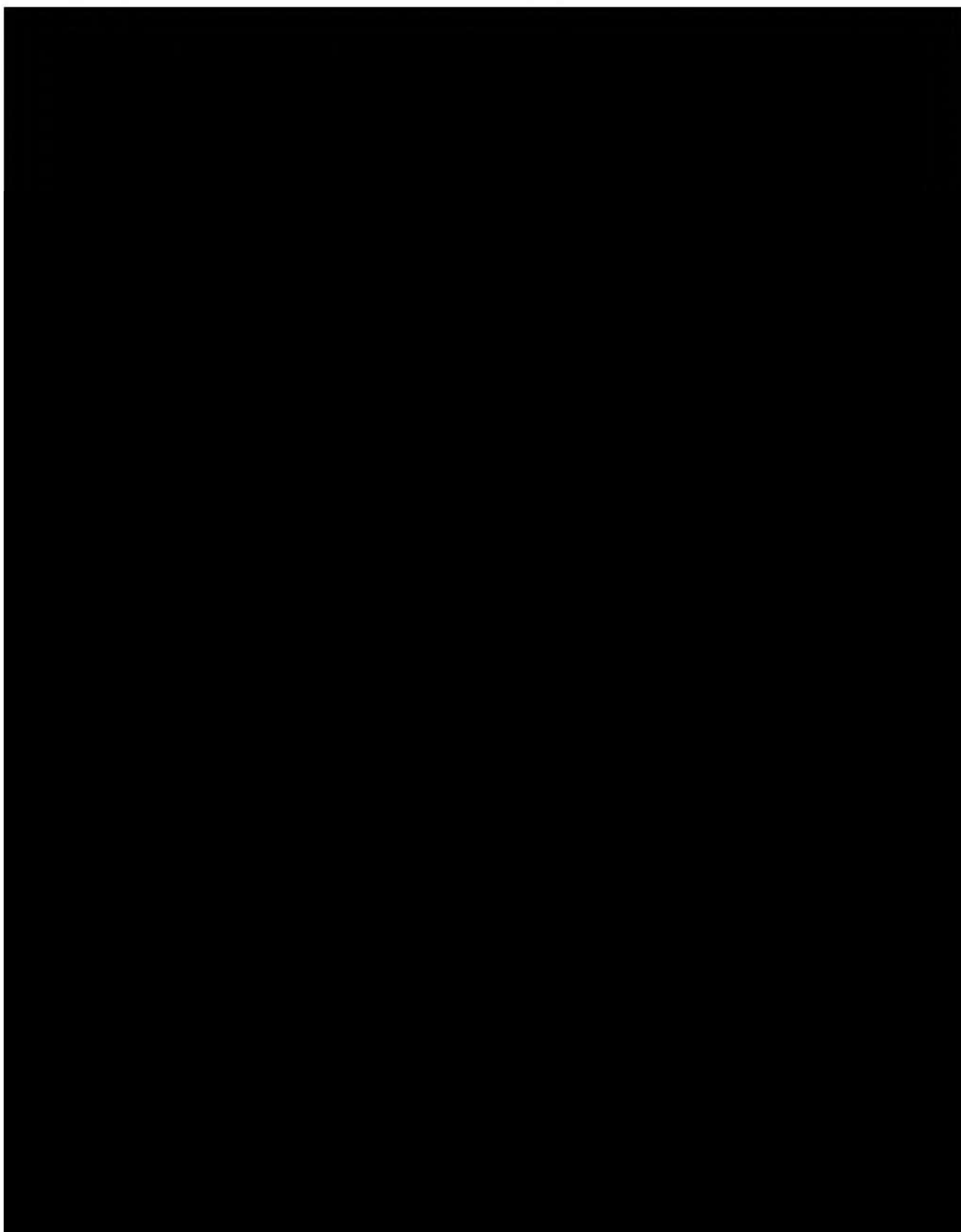


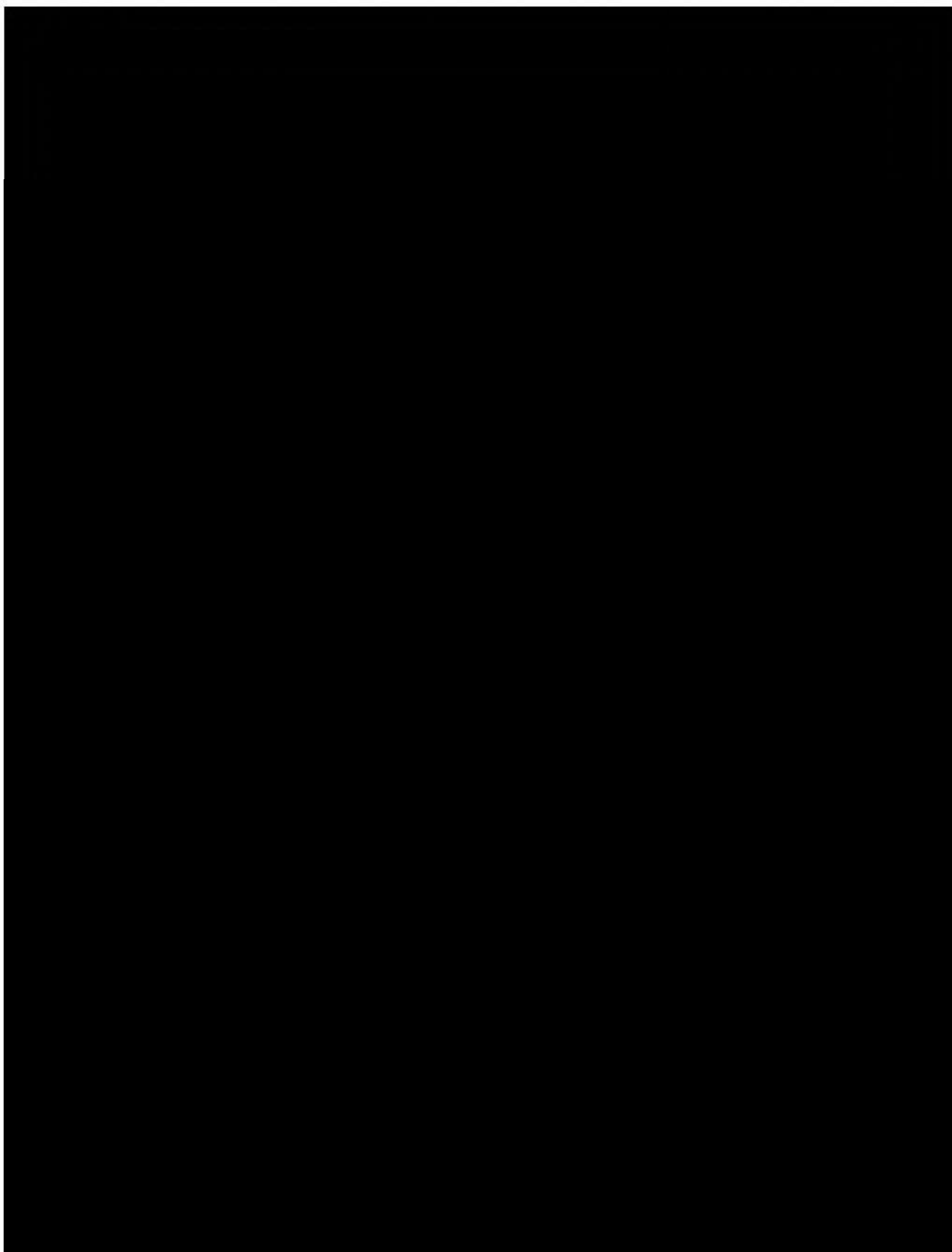


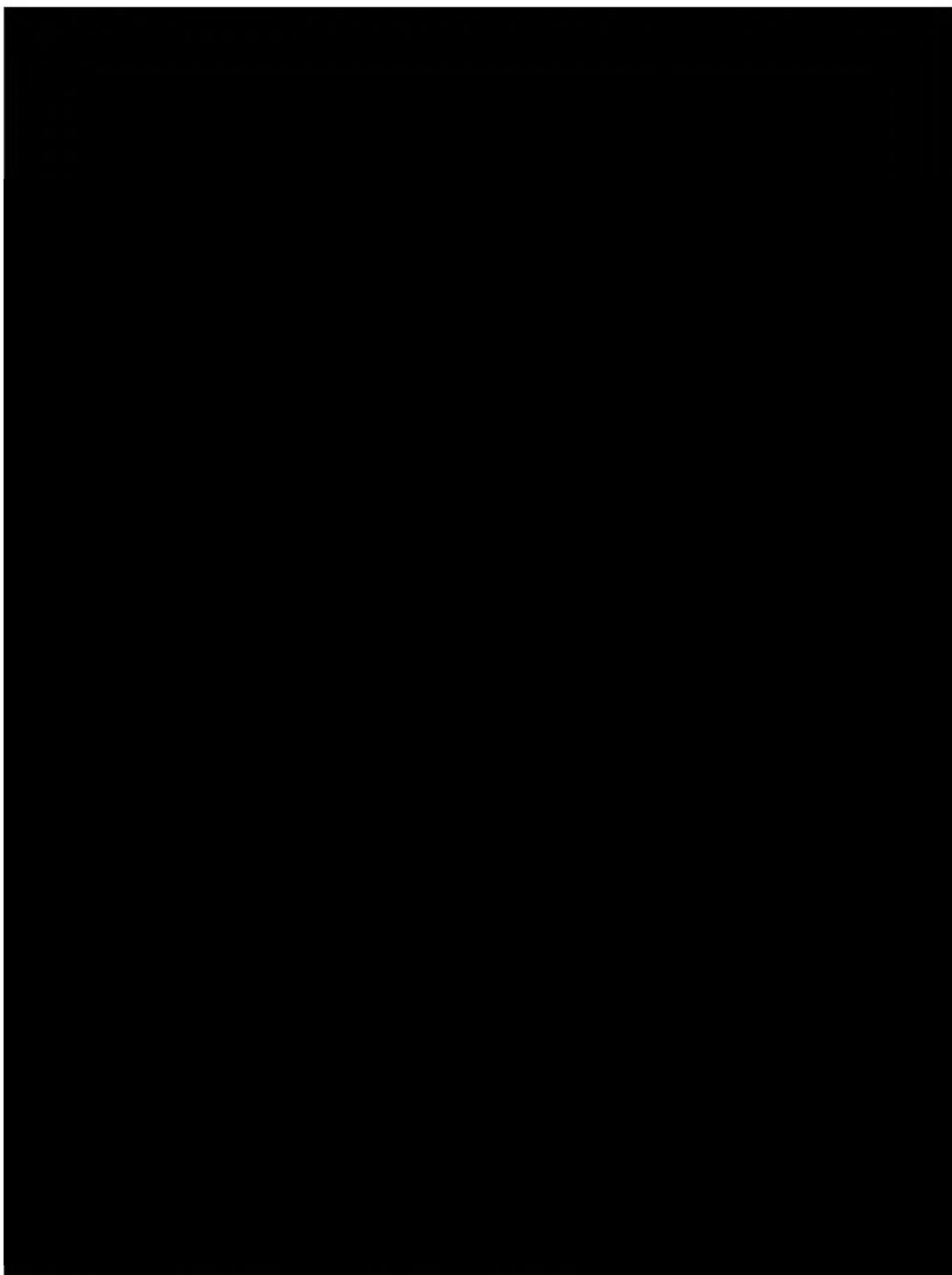


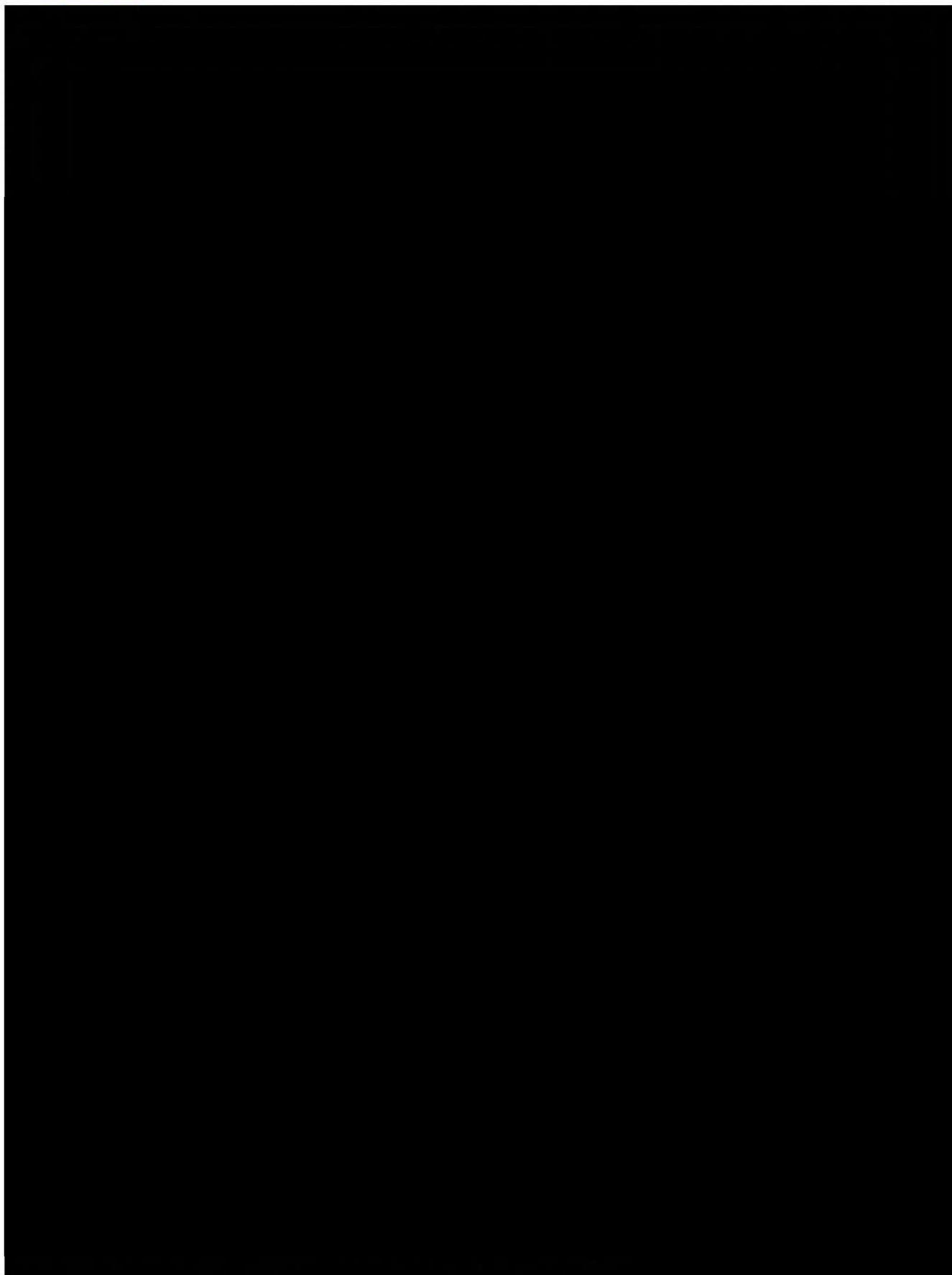


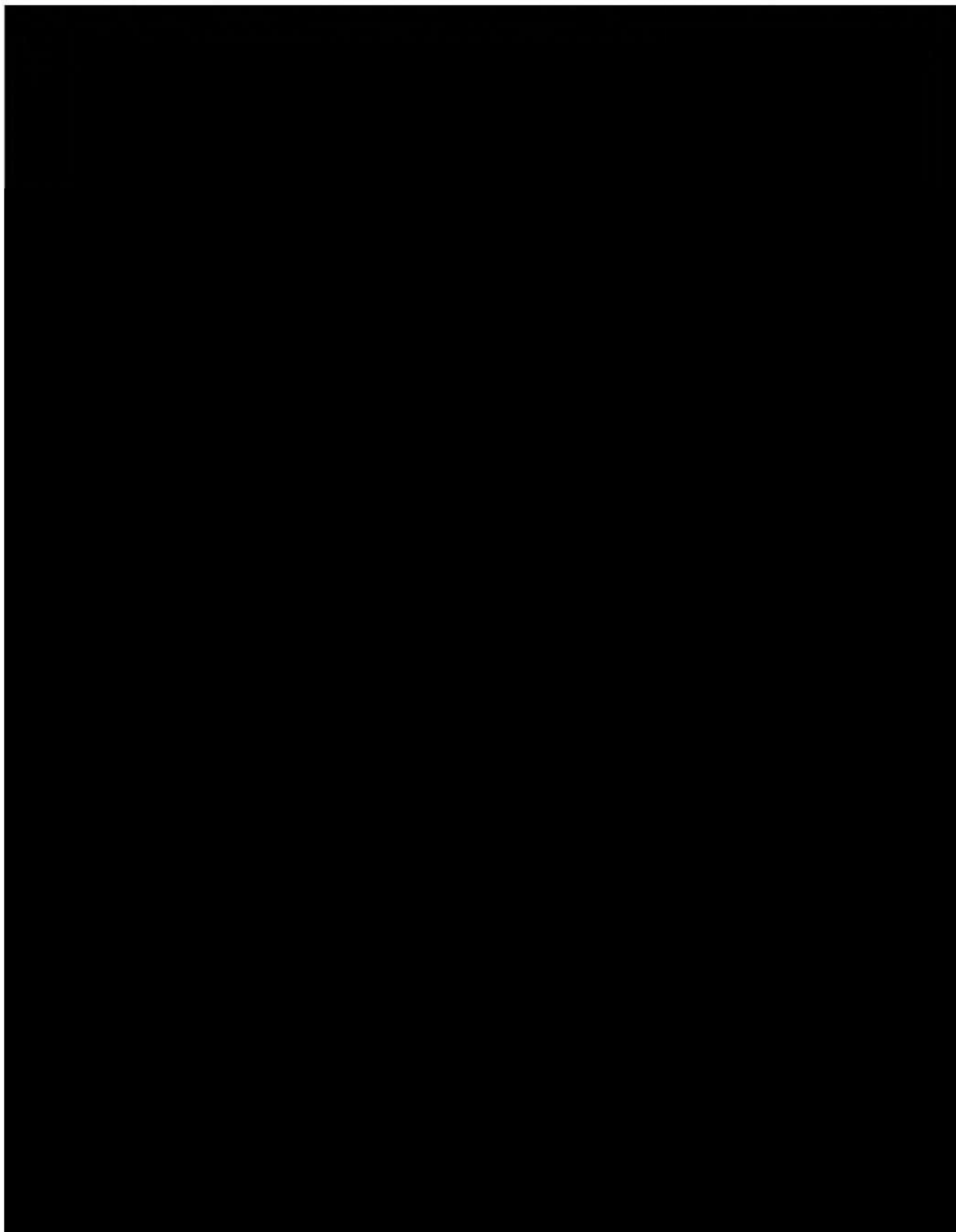


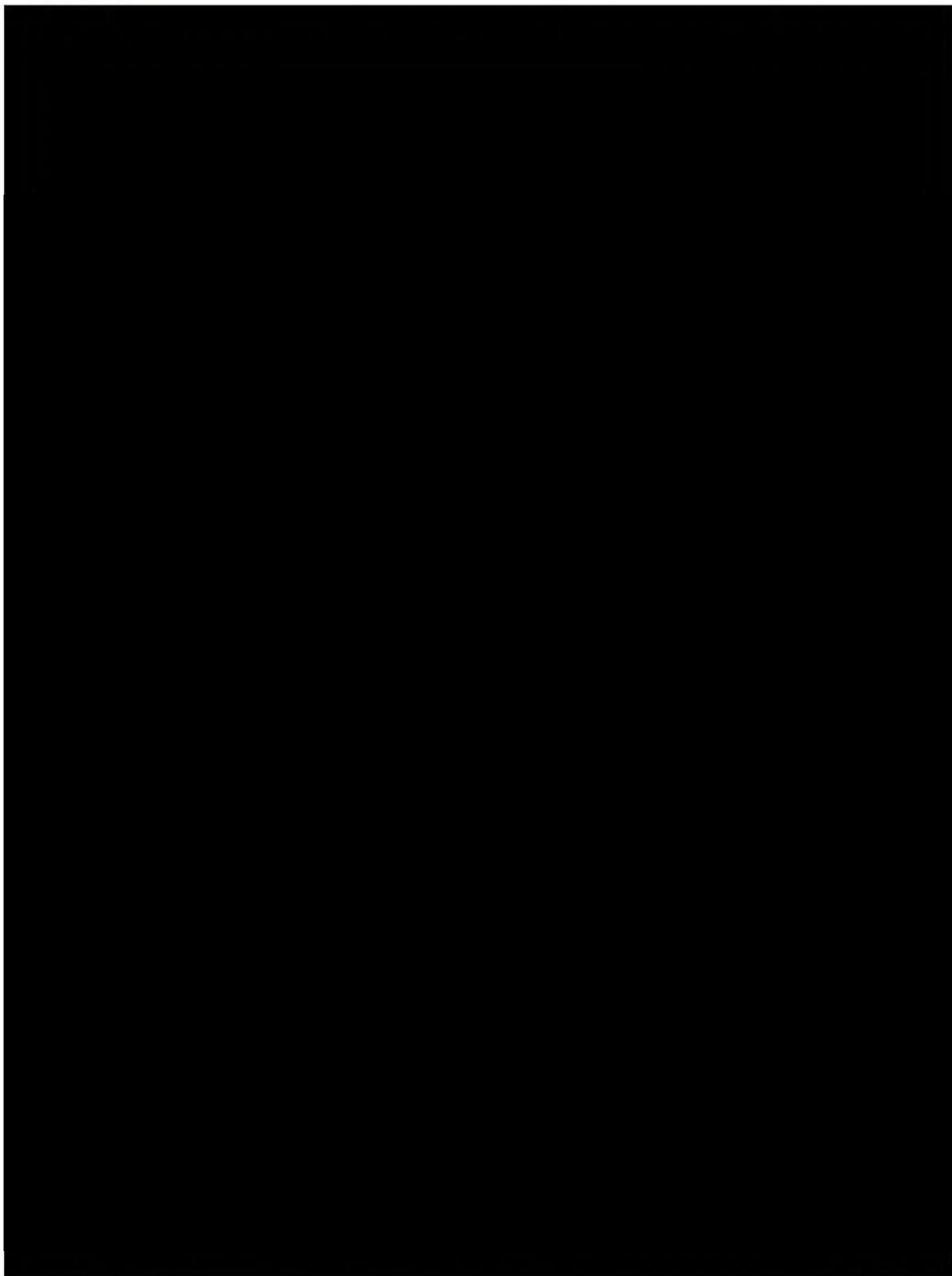


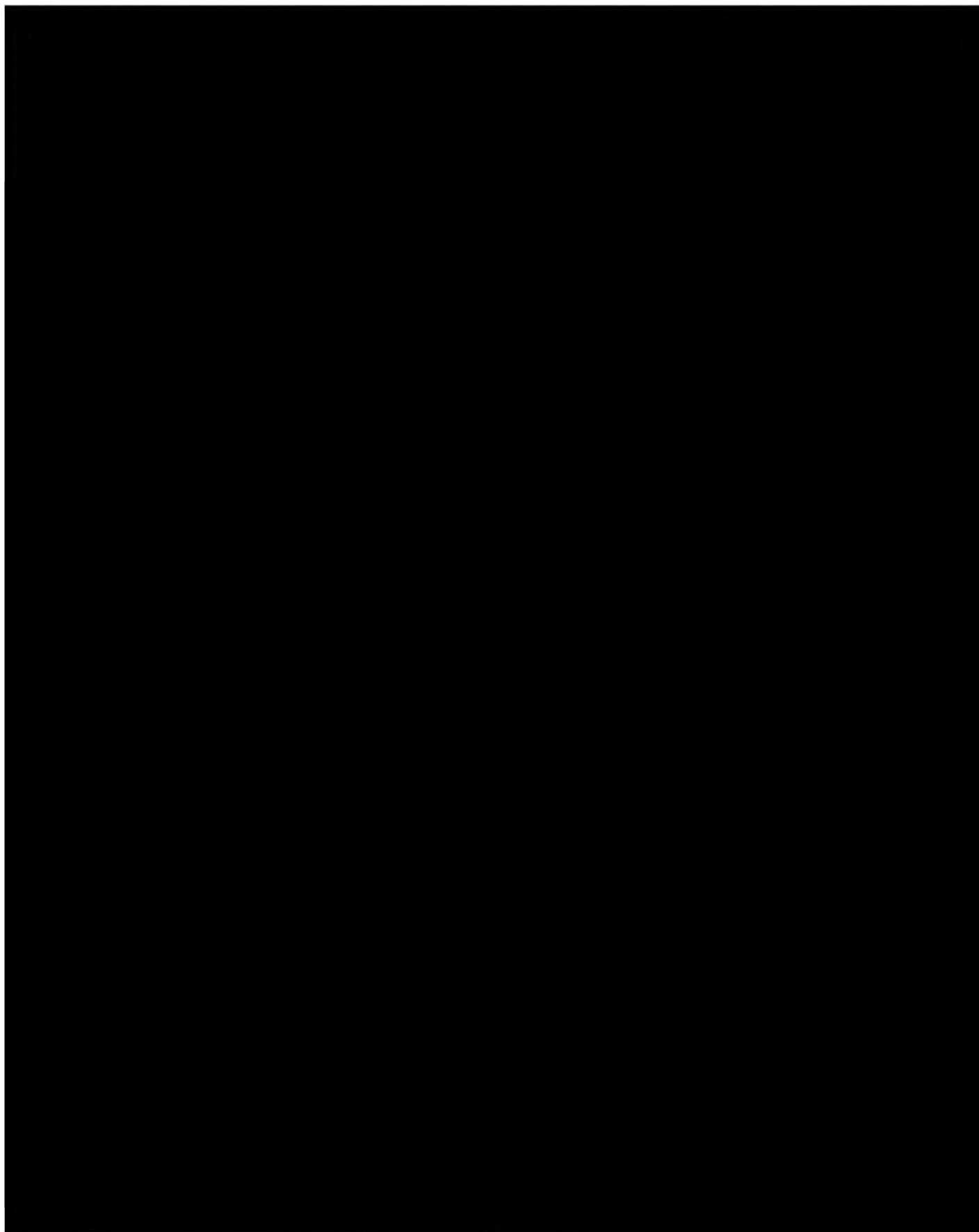


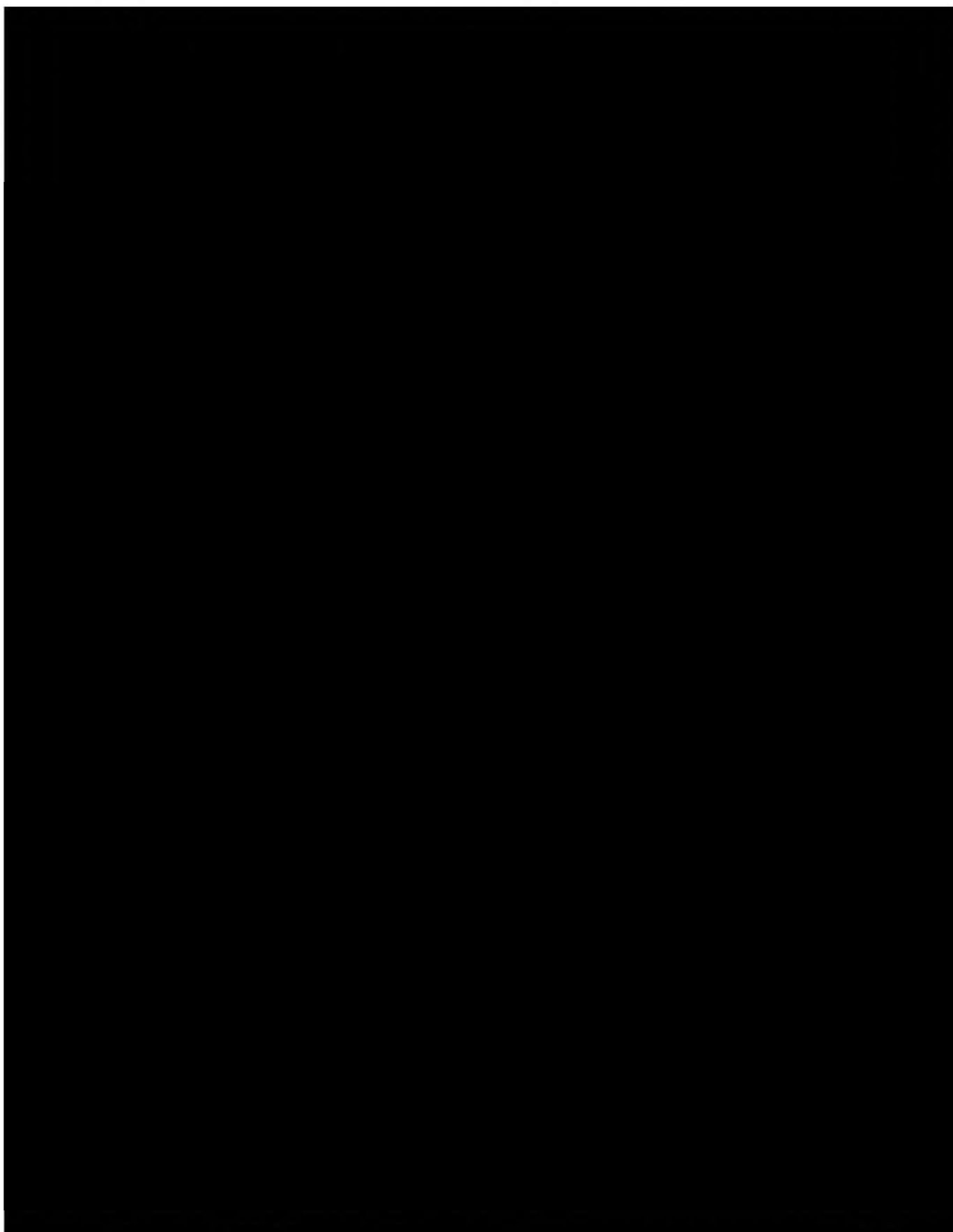


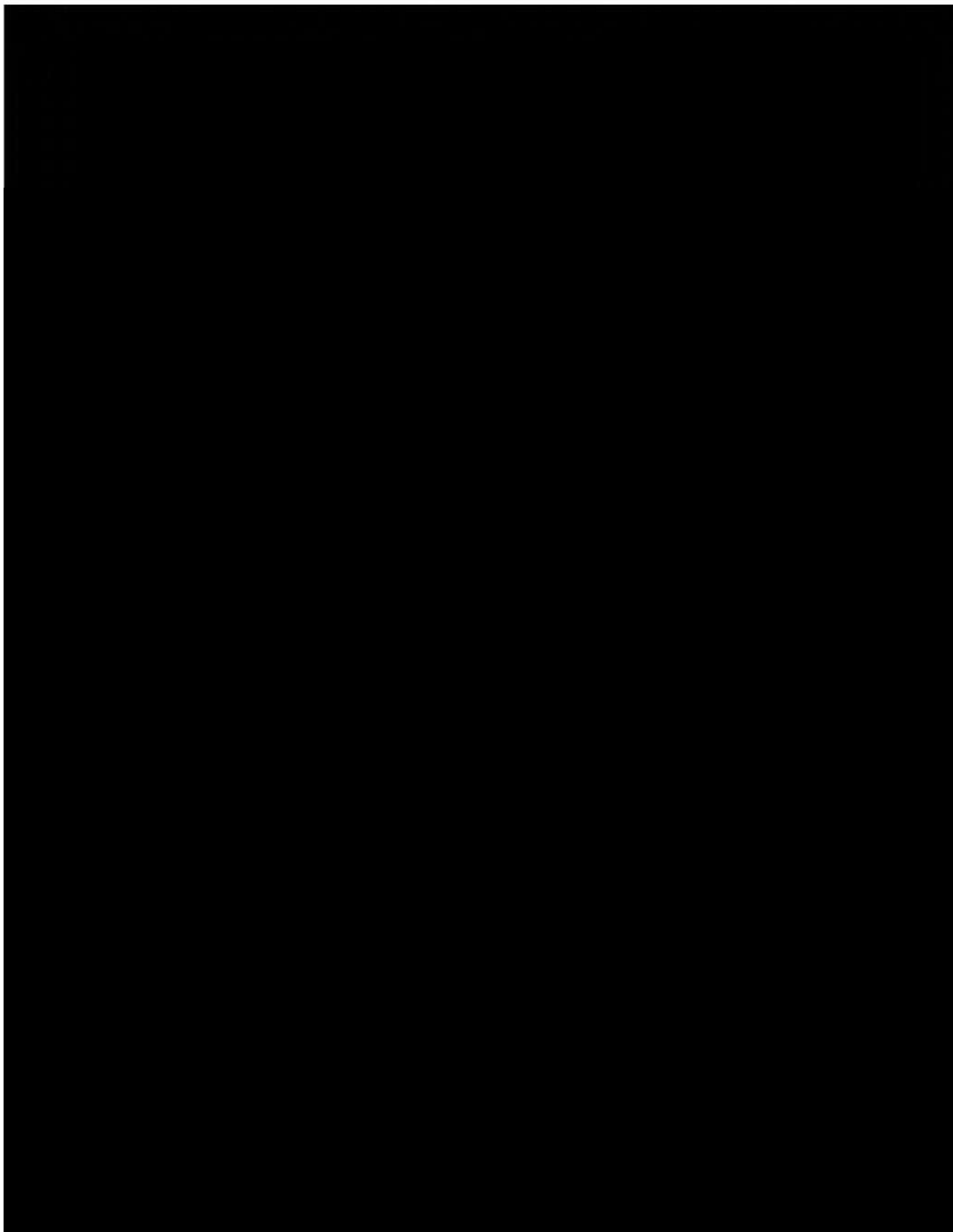


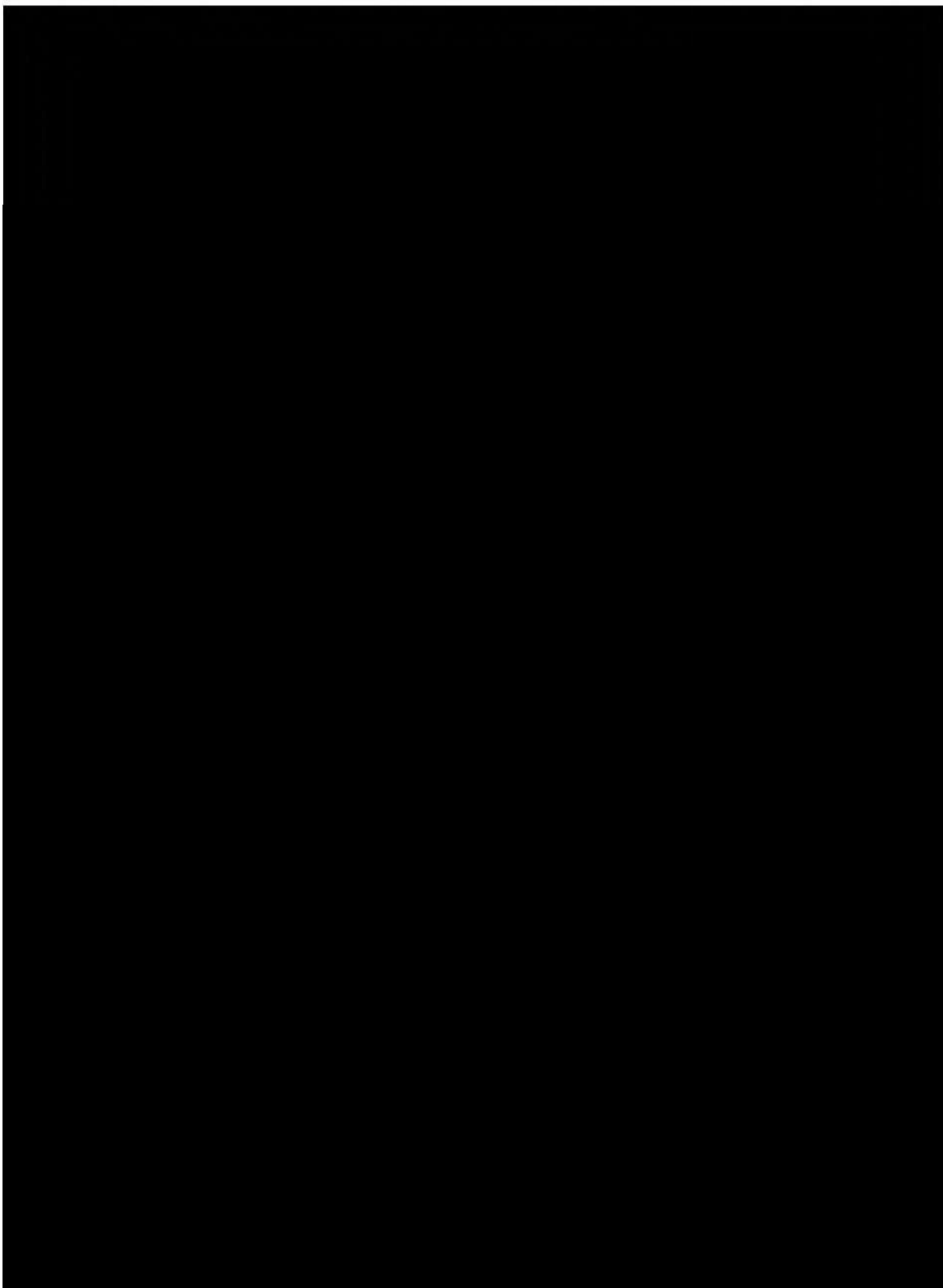


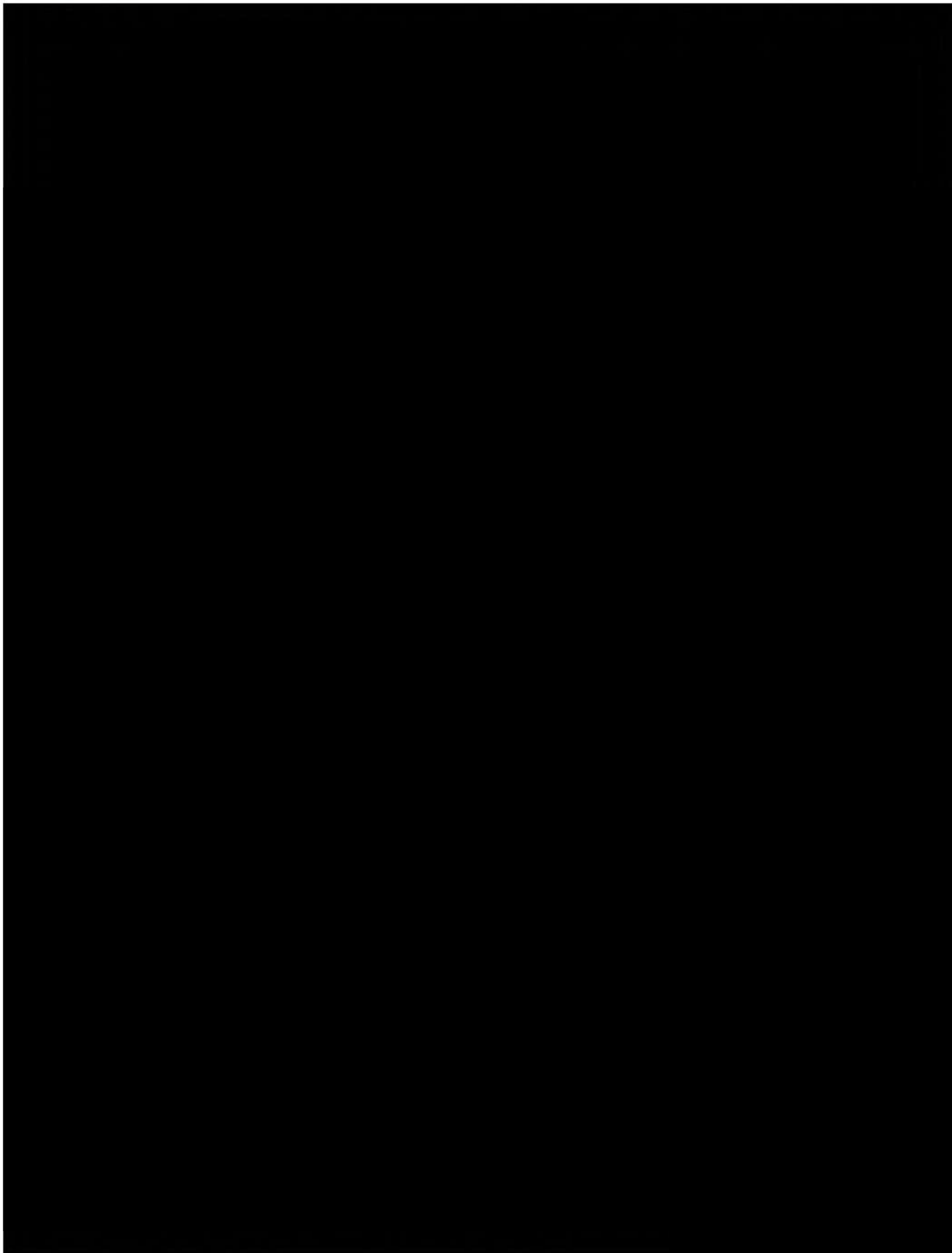


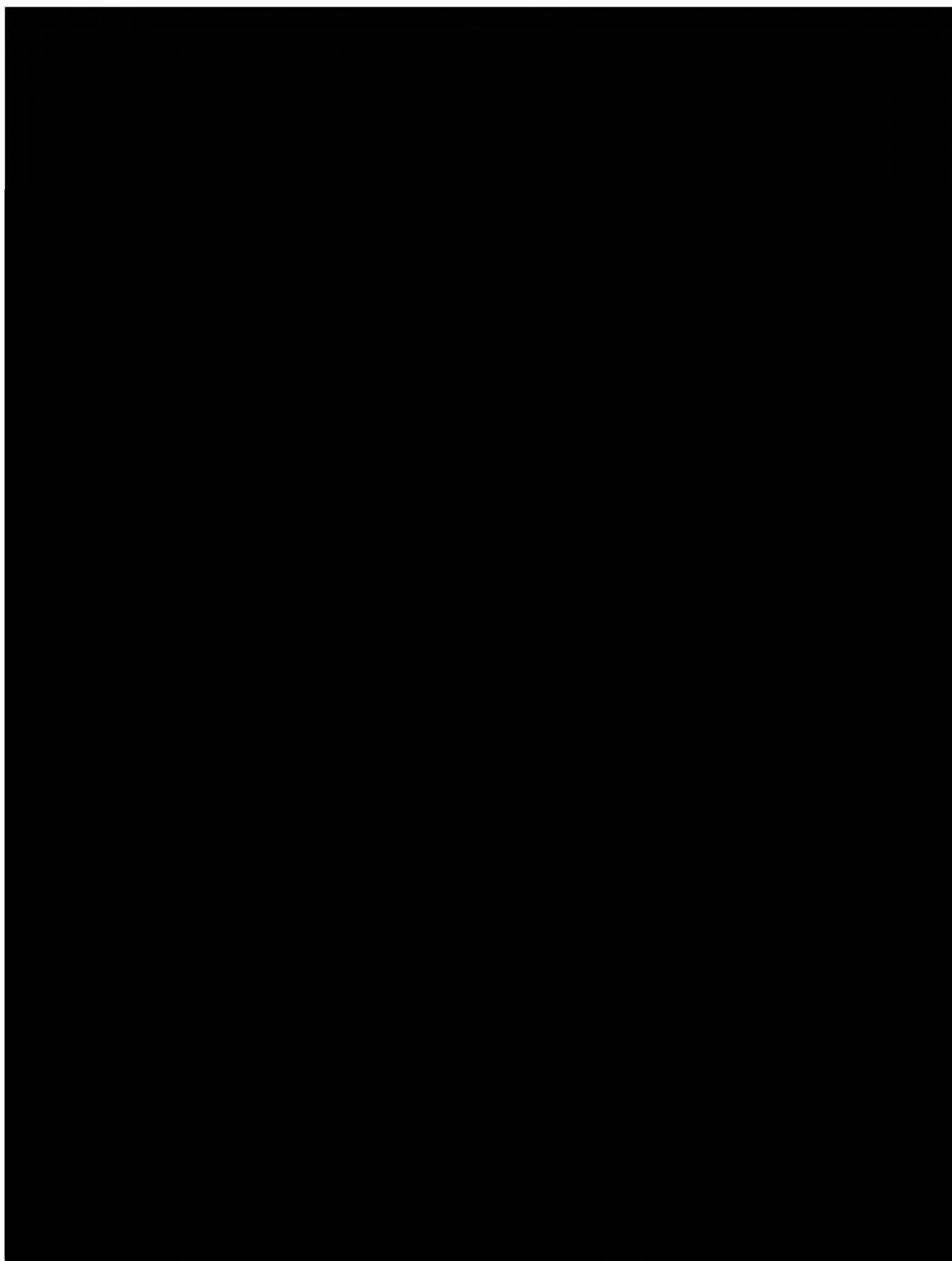


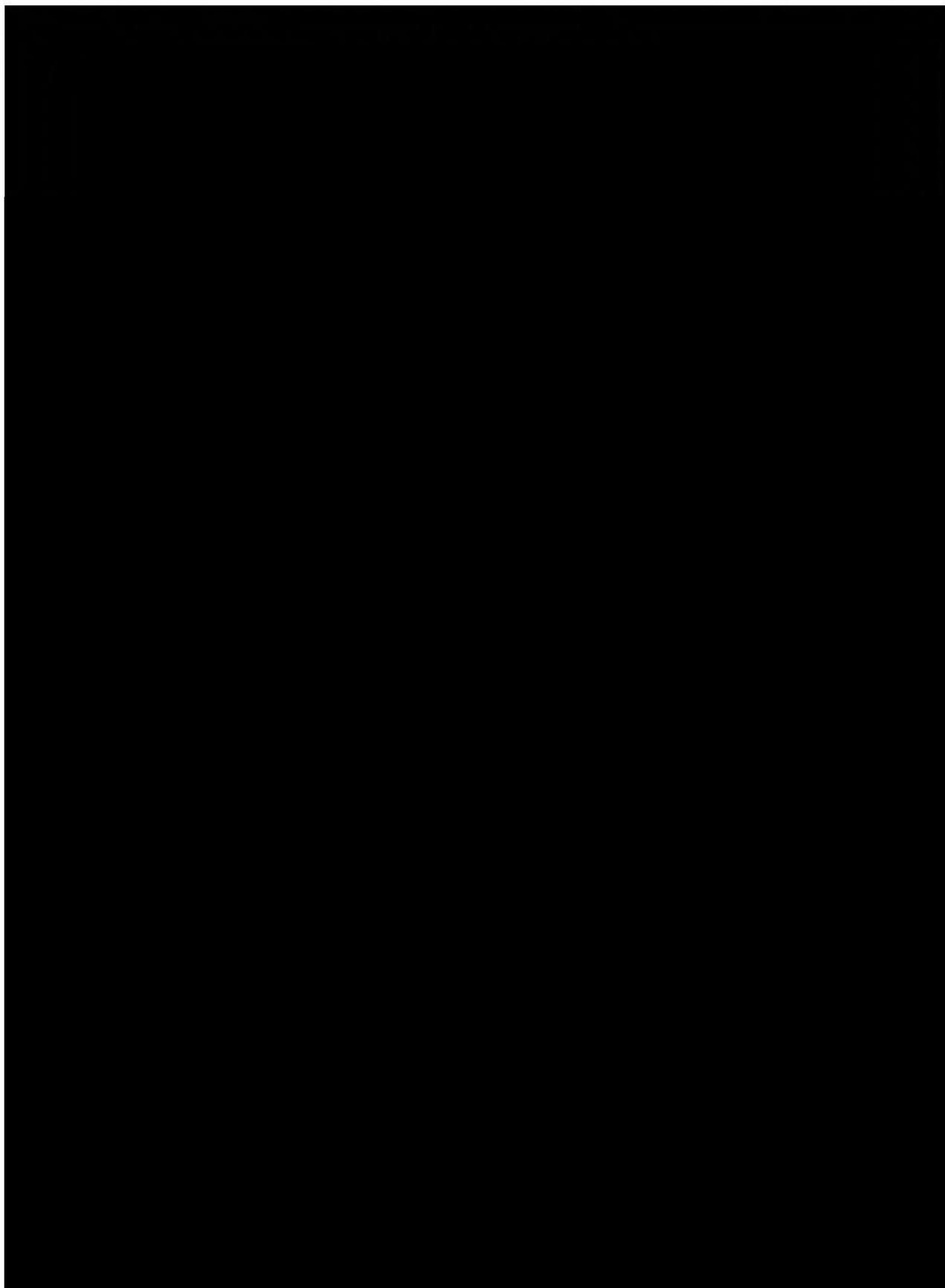


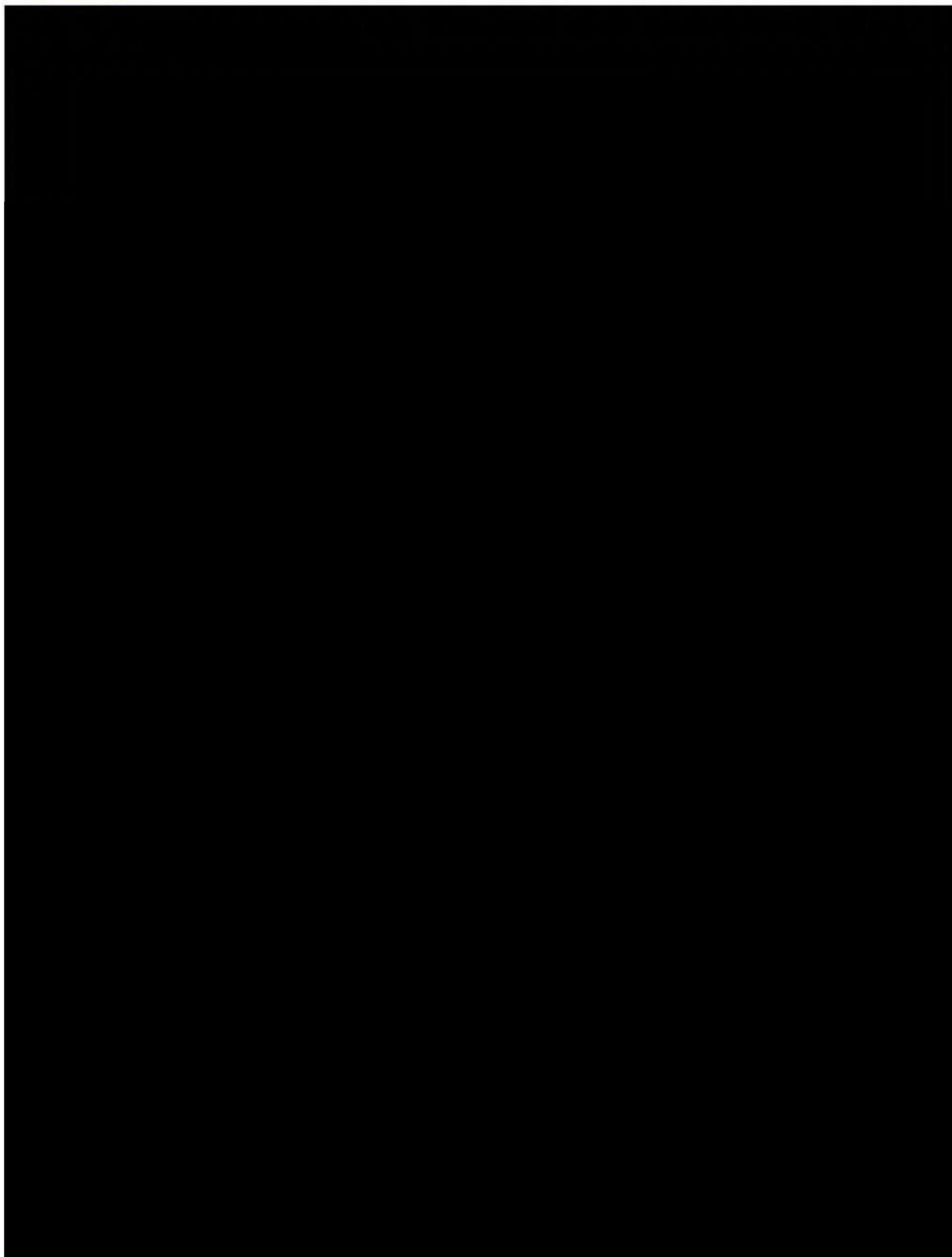


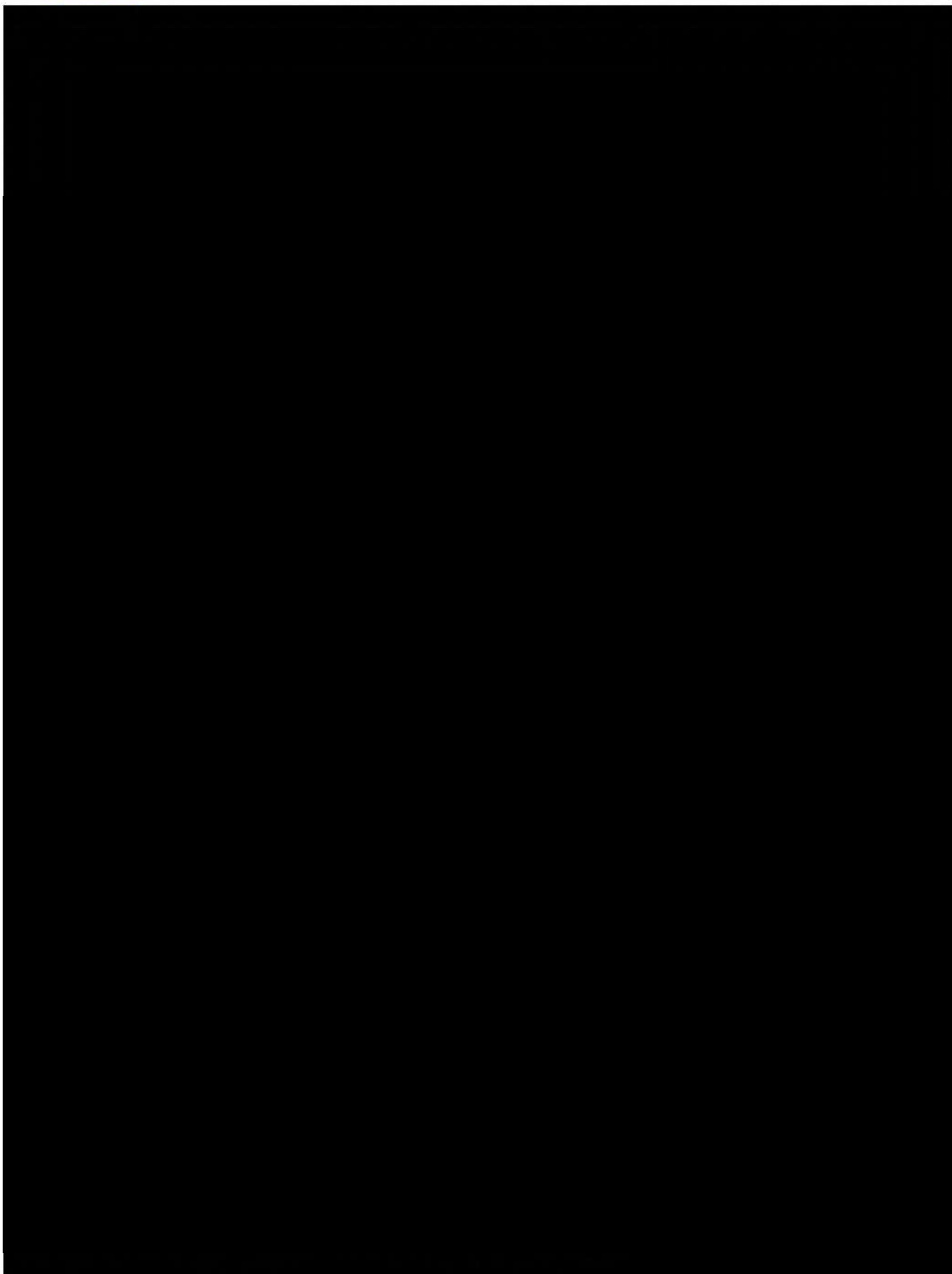


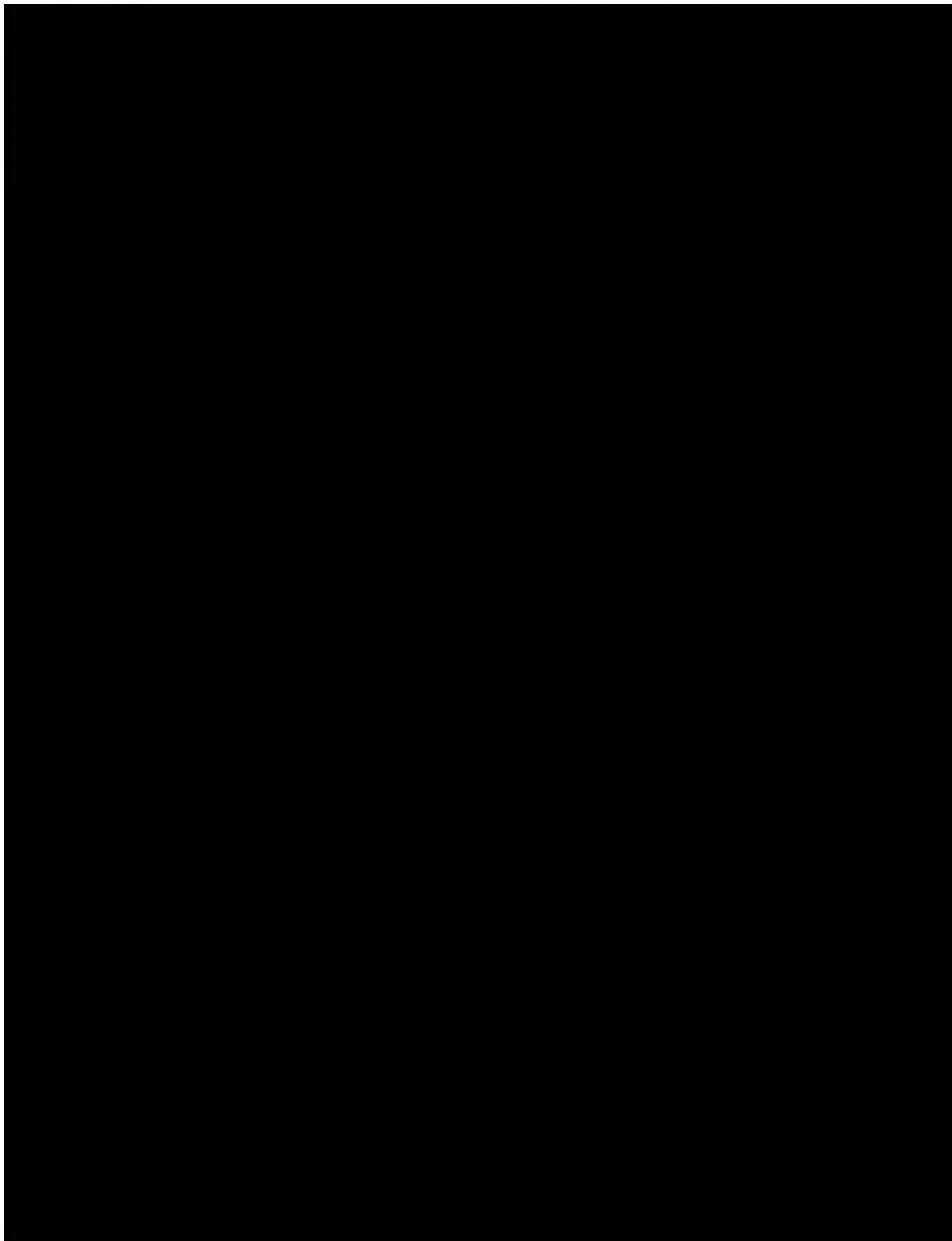












3. Caisse de transport

Lors de la publication du marché, la demande de la DRAC était de limiter au maximum les vibrations pour le transport de cette œuvre fragile déjà entreposée sur un paravent en aluminium et insérée dans une coque/capot elle aussi en aluminium.

La demande initiale était pour la réalisation de plusieurs caisses afin de tester différents systèmes de vibrations. Il a été décidé lors de la première réunion avec la DRAC que la contrainte de temps nécessitait de trouver une autre approche, plus efficace et économique en termes de matériaux et usage de véhicules. Une seule caisse avec des modifications a donc été prévue.

L'équipe qui a travaillé sur le design de la caisse et sa construction :

- Dr. -Ing. Habil. Kerstin Kracht – Expert of vibration technology and continuum dynamics
- Hizkia van Kralingen – HIZKIA Group
- Geert Verhoeff- HIZKIA The Hague
- Patrick van den Bout - HIZKIA The Hague
- Marcel Knoels - HIZKIA The Hague
- Rene Thomsen - HIZKIA Copenhagen
- Lars Aage Ipsen - HIZKIA Copenhagen

Des tests en laboratoire indépendants ont été effectués dans le cadre de cette étude. Ils ont montré que les *Wire Rope Isolators* ou WRI (voir 8 pour les fiches techniques) réalisés sur mesure présentent les meilleurs résultats en termes d'amorti.

3.1. Conception

3.1.1. Premier design de la caisse

En principe pour un transport minimisant les vibrations, l'emballage en caisse interne et caisse externe en bois avec isolateurs à câbles métalliques (WRI) constitue une solution très performante et économique, comparée à d'autres conceptions utilisant des WRI.

Pour un découplage optimal des vibrations de la caisse extérieure par rapport à la caisse intérieure, les deux sous-systèmes doivent présenter une première fréquence naturelle supérieure à 30 Hz. Cependant, l'inspection du 31 octobre 2025 a révélé que la coque possède des fréquences naturelles supérieures à 8 Hz et n'est donc pas suffisamment rigide pour un transport optimisé en termes de vibrations.

Puisque la coque ne doit subir aucune déformation structurelle, il est nécessaire de la rigidifier grâce à un caisson intérieur (ou caisse interne). Une rigidification adéquate ne peut être obtenue qu'au moyen d'un système de cadre (voir Figure 41), et non d'une simple caisse sans cadre. La conception de base à cadre double avec WRI a donc été retenue, conformément au schéma D 102024120145B3 (voir Figure 41).

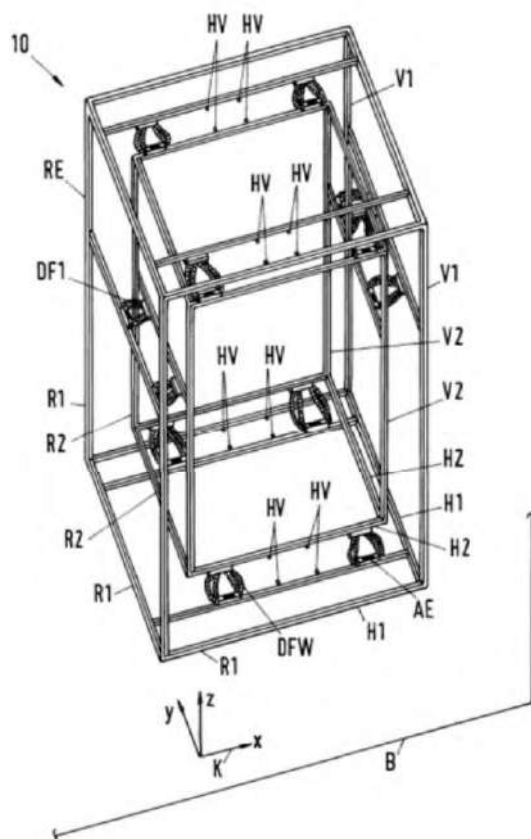


Figure 41 : Design initial d'un cadre dans un cadre WRI selon le schéma D 102024120145B3. ©HIZKIA

Pour amortir les vibrations (type membrane) des coques et obtenir un climat stable à l'intérieur de la coque, la structure interne de la conception de base a été renforcée par des parois de type sandwich.

Un amortisseur en caoutchouc à micro-chocs (voir fiche technique en 8) a été prévu pour éliminer les vibrations des coques, et des panneaux d'isolation condensés (voir fiche technique en 8) ont été proposés pour garantir un climat constant.

Le revêtement nécessaire de ces couches a été réalisé avec des panneaux MDF (voir fiche technique en 8). L'analyse vibratoire effectuée sur le camion de transport et le poids calculé à

supporter par les WRI ont permis de déterminer le type, le nombre maximal et le positionnement de ces amortisseurs.

Au total, 12 amortisseurs WRI maximum sont utilisés, 8 en bas et 4 en haut, disposés par rangées de deux.

3.1.2. Conception CAO



Figure 42 : Simulation 3D en CAO de la caisse HIZKIA U+. ©HIZKIA

La caisse mesure 327 Long x 160 large x 255 cm de haut.

La caisse pleine pèse 1 685kg et 1 035kg vide.

APERÇU

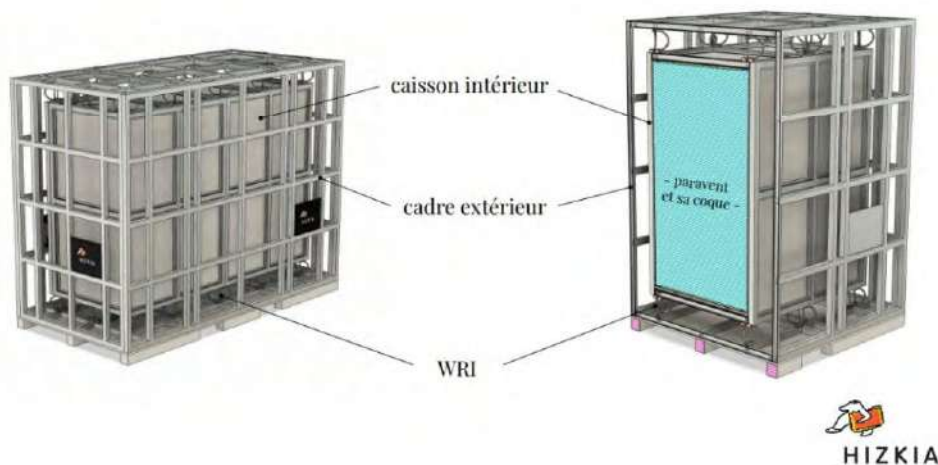


Figure 43 : Aperçu de la caisse HIZKIA U+. ©HIZKIA

CAISSON INTÉRIEUR

Le cadre de la structure intérieure est constitué de 8 panneaux de profilé aluminium de 50x 50x 5. Ils ont des profilés en L soudés dans chaque "fenêtre". Cette structure supporte tout d'abord un premier panneau de contreplaqué de 6mm (peint en blanc), puis un panneau VIP de 10mm lui aussi à l'intérieur de la "fenêtre". Le panneau dans son ensemble est refermé pas un contreplaqué de 6mm à l'intérieur contenant le matériel Microshock

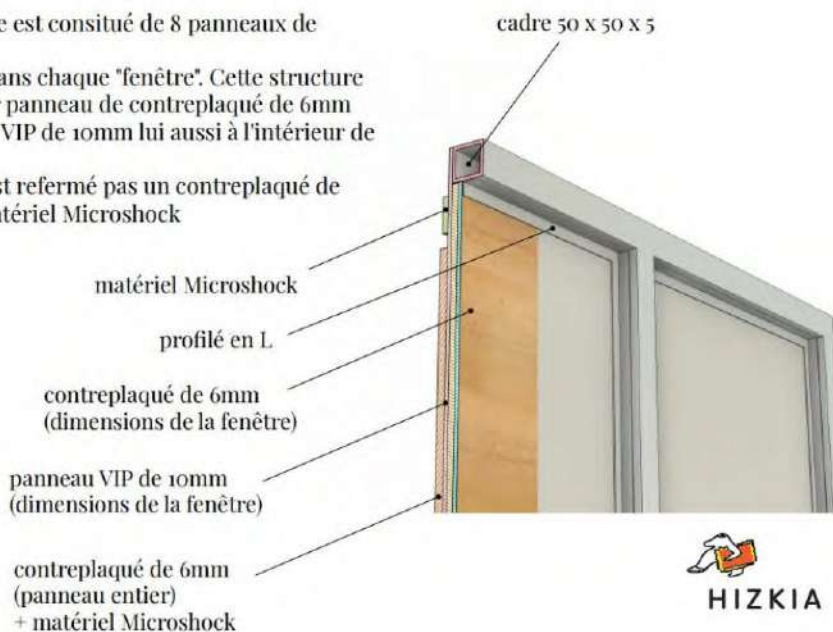


Figure 44 : Description de la caisse interne. ©HIZKIA

CADRE EXTÉRIEUR

Le cadre extérieur est aussi fabriqué à partir de profilé de 50x 50x 5. Le cadre se structure de différents panneaux, comme le cadre intérieur. Les parois sont ouvertes et sans panneaux afin de faciliter le montage des WRI sur la structure. La base du cadre est fixé sur une structure en bois pour une manipulation plus facile.

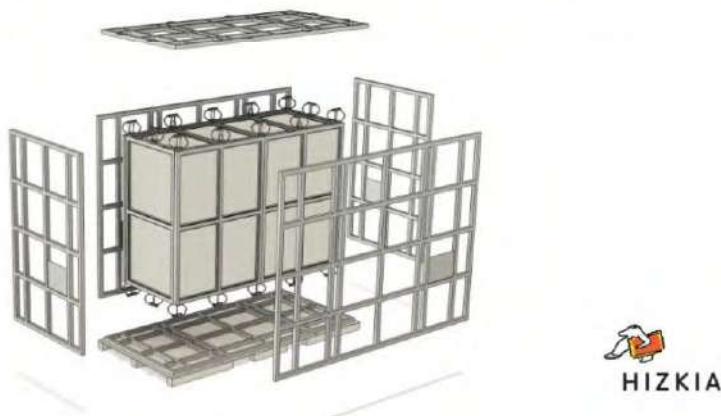


Figure 45 : Description de la caisse externe. ©HIZKIA

Les fiches techniques des produits utilisés sont en 8.

3.2. Test mécaniques

3.2.1. Serie de test : test du camion

Les 10 fréquences naturelles de la caisse du camion sont listées dans le tableau N°1.

Tableau 1 : les 10 plus petites fréquences naturelles en Hz.

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nat. Frequ. in Hz	1,9	2,8	5.3	7	8.3	9.4	10.4	12.6	13.6	15.6

Le modèle géométrique MA et les trois premières formes de déflexion vibratoire correspondantes sont présentés dans la Figure 46.

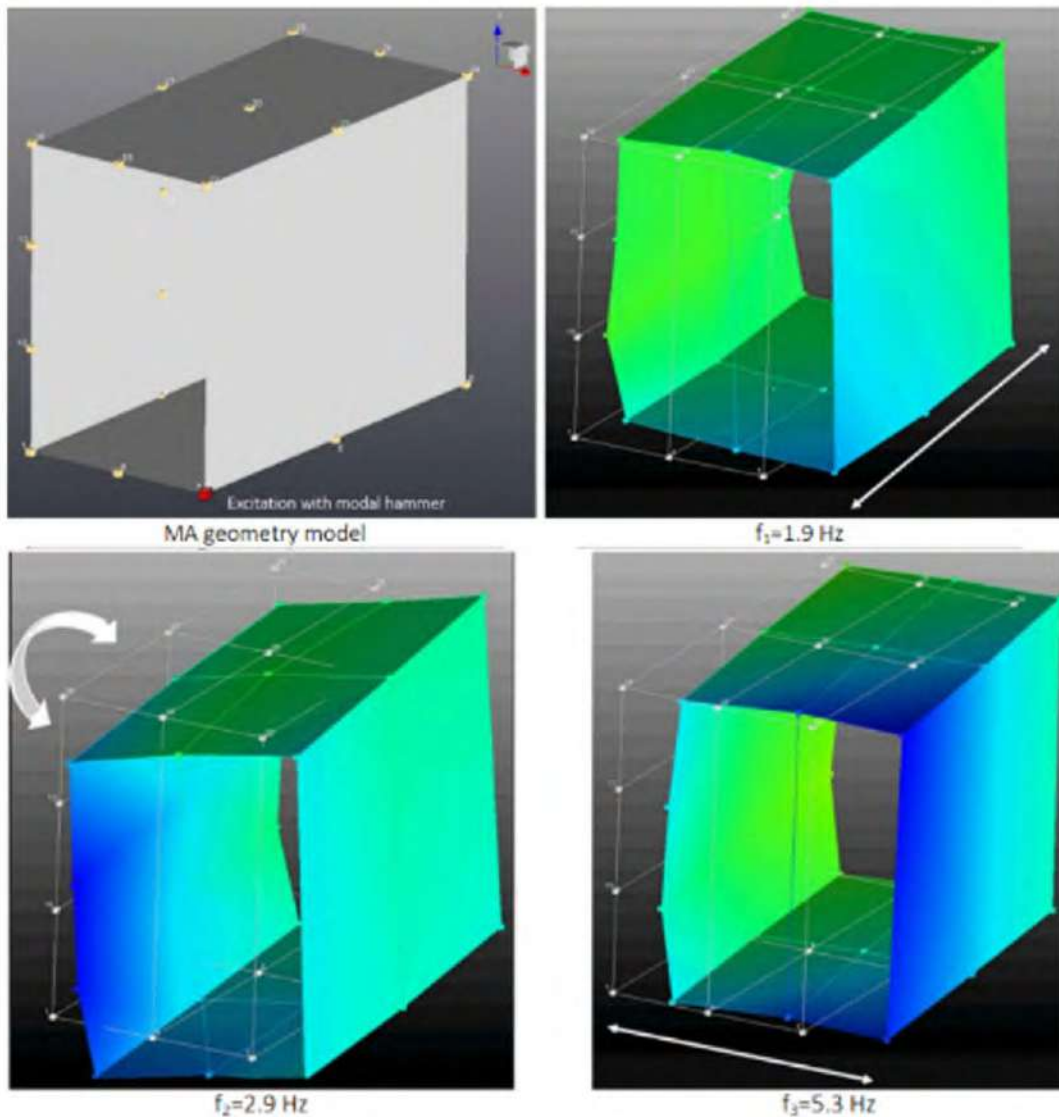


Figure 46 : Modèle géométrique (MA) et les trois premières formes de déflexion correspondantes.
©HIZKIA

Conclusion : le meilleur emplacement pour la caisse à bord d'un camion est au milieu.

3.2.2. Tests vibratoires du roulement du camion

Analyse vibratoire opérationnelle (AVO) d'un camion.

L'AVO vise à étudier la réponse vibratoire d'un système mécanique lors d'une opération spécifique. On examine les amplitudes minimales et maximales, les valeurs moyennes des

signaux enregistrés, ainsi que leurs plages de fréquences. Cette méthode est souvent utilisée pour déterminer le niveau d'isolation ou de réduction des vibrations.

Tableau 2 : Récapitulatif des tests effectués

Test type	Test Series No.	Test object	Test date	Test description
Experimental	1.1	Truck Mercedes Actros	15.01.2025	MA
	1.2			OVA
	2	Package	28.01.2026	MA
	3.1	Package + inner frame	28.01.2026	MA
	3.2	Complete; Package + inner frame + outer frame	28.-29.01.2026	MA
	3.2			OVA
Simulative	4	Package	16.01.2025 – 25.01.2026	MA, Modelling of replacement system for fast simulations
	5	Package + inner frame		MA
	6	Outer frame		MA
	7	Complete; Package + inner frame + outer frame		MA
				OVA

Tableau 3 : équipement expérimental

Device	Quantity	Voltage proportional physical unit	Manufacturer and type
ACC (triaxial)	1	Acceleration	PCB 356A16
ACC (triaxial)	1	Acceleration	PCB 356A01
Geophones	4	Velocity	Geospace HS1
Modal hammer	1	Force	PCB 086D20
Measurement system 1 (frontend)	1	---	SIEMENS SCADAS mobile 3
Software vibration measurement system	1	---	Siemens LMS Test.Lab MIMO FRF Testing
Measurement system 1 (frontend)	1	---	DATA TRANSLATION DT9837A
Software vibration measurement system	1	---	DATA TRANSLATION QuickDAQ 3.7.0.49 Standard

Le camion testé et la configuration pour l'OVA du camion sont illustrés sur la Figure 47.

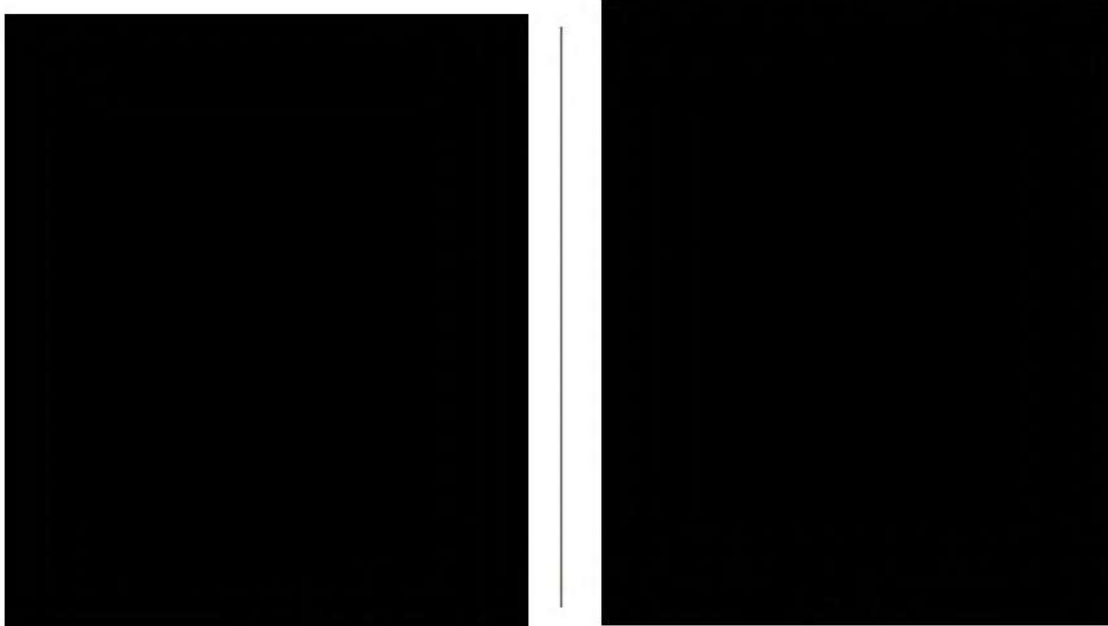


Figure 47 : Dispositif de test OVA du camion. ©HIZKIA

Pour réaliser le test OVA, un itinéraire a été parcouru comprenant les quatre types de routes critiques :

- Route de campagne avec de fortes bosses,
- Route de campagne avec des virages serrés,
- Rue urbaine avec circulation dense,
- Autoroute.

L'itinéraire exact (aux alentours de Hagenow, Mecklembourg-Poméranie-Occidentale, Allemagne) est indiqué sur la Figure 48.



Figure 48 : Itinéraire des essais du camion OVA. ©HIZKIA

Des exemples de chronologies de vitesse de vibration sont présentés dans les Figure 49 et Figure 50.

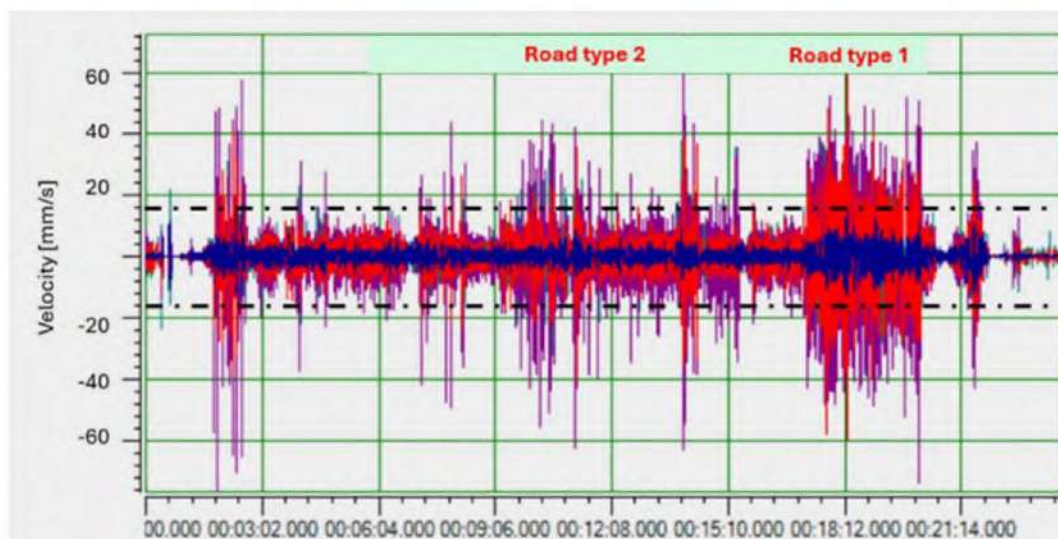


Figure 49 : Chronologie mesurée sur les routes de type 1 et 2. ©HIZKIA

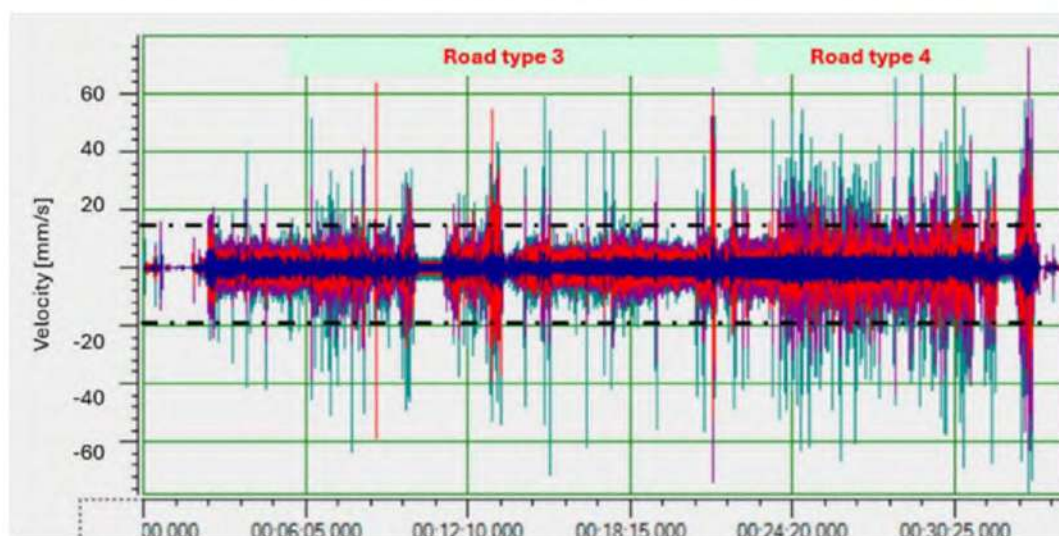


Figure 50 : Chronologie mesurée sur les routes de type 3 et 4. ©HIZKIA

Ces résultats de mesure révèlent un comportement typique du camion : les principaux modes de vibration correspondent aux 2^e et 4^e modes propres de la caisse. L'amplitude absolue de la vibration principale est $|a| < 20 \text{ mm/s}$. Des vitesses de vibration maximales de 60 mm/s ont été enregistrées sur la plateforme du camion.

Le style de conduite peut être qualifié de relativement rapide.

Conclusion : nous recommandons d'effectuer le premier essai de conduite à vitesse normale.

3.2.3. Modélisation numérique vibrationnelle par MEF du système de transfert et de sa caisse

3.2.3.1. Système de transfert

Le système de transfert, que nous appellerons l'enveloppe, a également été testé par simulation. Les plans techniques de l'enveloppe fournis par SMACH ont été importés avec succès dans le logiciel d'éléments finis.

Le niveau de détail des plans techniques rendait initialement impossible un calcul par éléments finis. En l'absence de valeurs caractéristiques pour les liaisons, seuls les composants individuels, tels que les profilés en aluminium et les plaques de recouvrement, ont pu être analysés par analyse modale (AM) basée sur la simulation.

La Figure 51 présente des exemples des premiers modes de déformation calculés pour un recouvrement frontal et un recouvrement latéral. Les modèles par éléments finis des deux recouvrements ont été verrouillés dans les trois directions spatiales au niveau des bords fixés dans le plan réel.

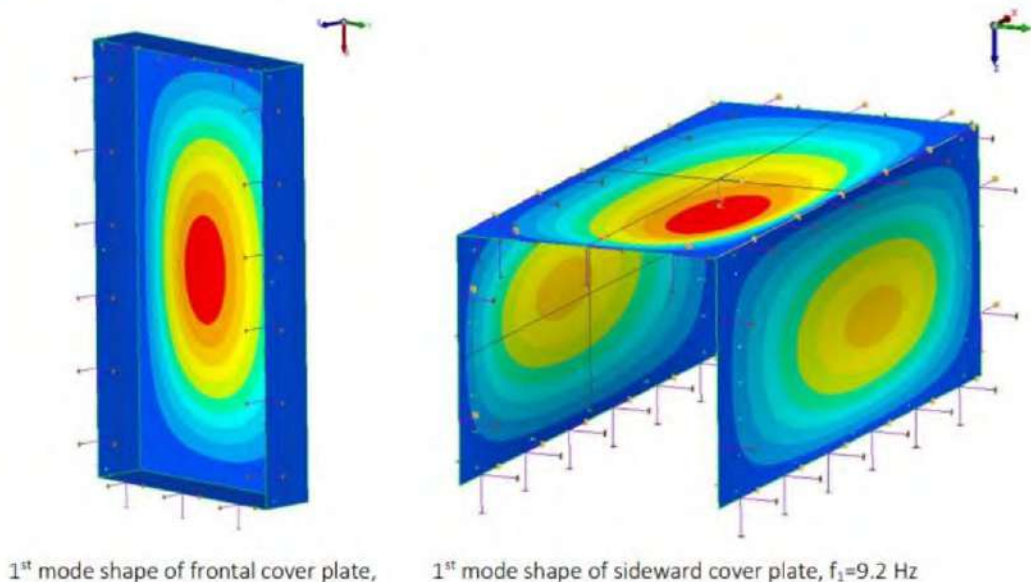


Figure 51 : Premiers modes de vibration des enveloppes calculés par éléments finis. ©HIZKIA

Toutes les grandes surfaces vibrent comme une membrane. La fréquence propre la plus basse du capot avant est de 15,1 Hz et celle du capot latéral de 9,2 Hz.

Pour intégrer la membrane dans la conception de la caisse, cette dernière a été définie comme une boîte aux dimensions et au poids réels, ainsi qu'à la rigidité supérieure au seuil requis de 30 Hz.

3.2.3.2. La caisse interne

La modélisation par éléments finis de la caisse interne a été réalisée en deux étapes. Premièrement, le cadre intérieur a été conçu. Afin de stabiliser le contenant et de limiter les fréquences propres à moins de 30 Hz, la conception du cadre intérieur est la suivante :

- Dimensions intérieures identiques à celles du système de transfert,
- Profilés en aluminium : creux rectangulaires, 50 mm x 50 mm x 3 mm,
- Poids : $m = 109,6$ kg.

Dans un second temps, les exigences minimales pour les parois assemblées avec le cadre intérieur ont été définies. Il s'est avéré qu'un panneau complet ne serait pas monté sur chaque face latérale, mais que chaque section serait plutôt composée de panneaux, comme un puzzle. Le design initial et leur mode de vibration naturel sont montrés dans la Figure 52.

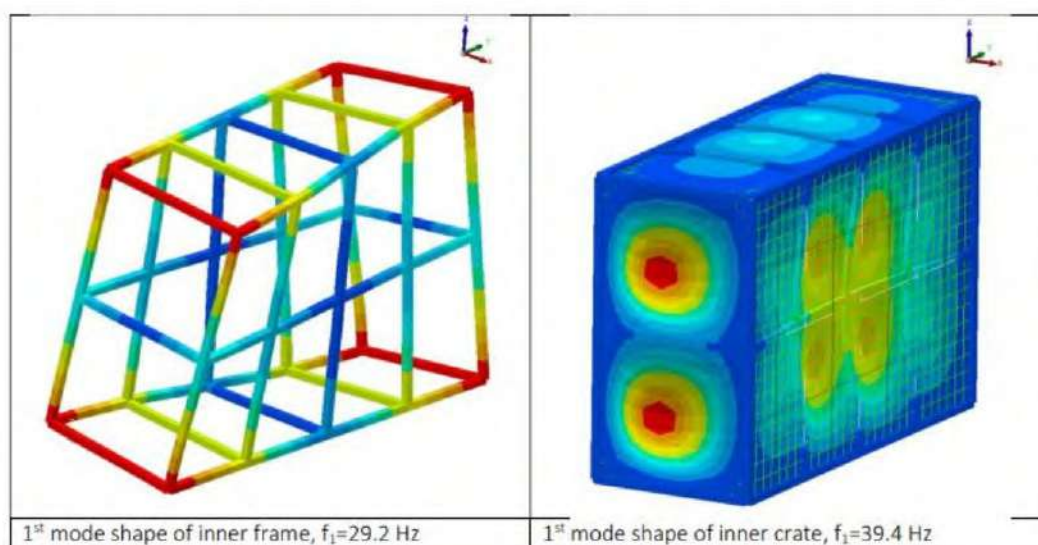


Figure 52 : Premiers modes de vibrations naturels du cadre intérieur et de la caisse interne calculés par éléments finis. ©HIZKIA

Il a été déterminé que la première fréquence naturelle du cadre intérieur était légèrement inférieure à 30 Hz. Cependant, le revêtement du cadre intérieur avec des panneaux MDF de 6 mm d'épaisseur ayant permis d'obtenir une première fréquence propre de 39 Hz, conforme aux exigences, la conception du caisse interne a été conservée.

3.2.3.3. Caisse externe

La caisse externe doit également présenter des fréquences naturelles supérieures à 30 Hz. De plus, il doit être particulièrement rigide au niveau des supports WRI et garantir une distance de 180 mm entre lui et le caisson intérieur sur toutes ses surfaces. La conception résultante, avec des profilés en aluminium (50 mm x 50 mm x 3 mm), et la première modélisation propre sont illustrés sur la Figure 53.

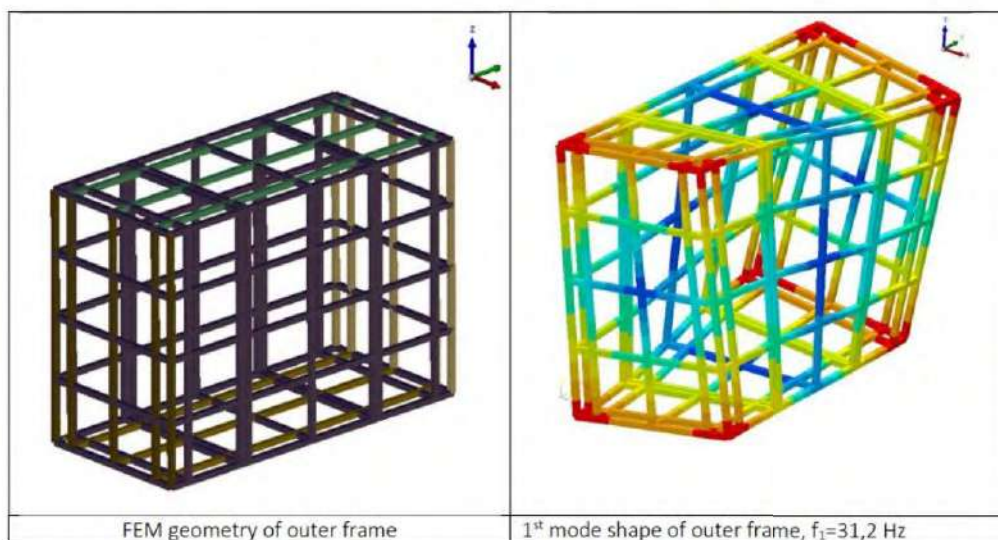


Figure 53 : Géométrie et premier mode de forme de la caisse externe calculés par la méthode des éléments finis. ©HIZKIA

Les trois conditions sont remplies lors des tests par simulations.

3.2.3.4. La caisse HIZKIA U+ complète

La simulation MA montre que les 6 fréquences d'isolation vibratoire sont de 0,11 Hz ; 0,46 Hz ; 0,95 Hz ; 4,7 Hz ; 7,5 Hz et 9,0 Hz. De plus, la première fréquence propre de la caisse interne avec le système de transfert est de 28,9 Hz et celle de la caisse externe de 31,5 Hz. Les modes propres correspondants sont illustrés à la Figure 54.

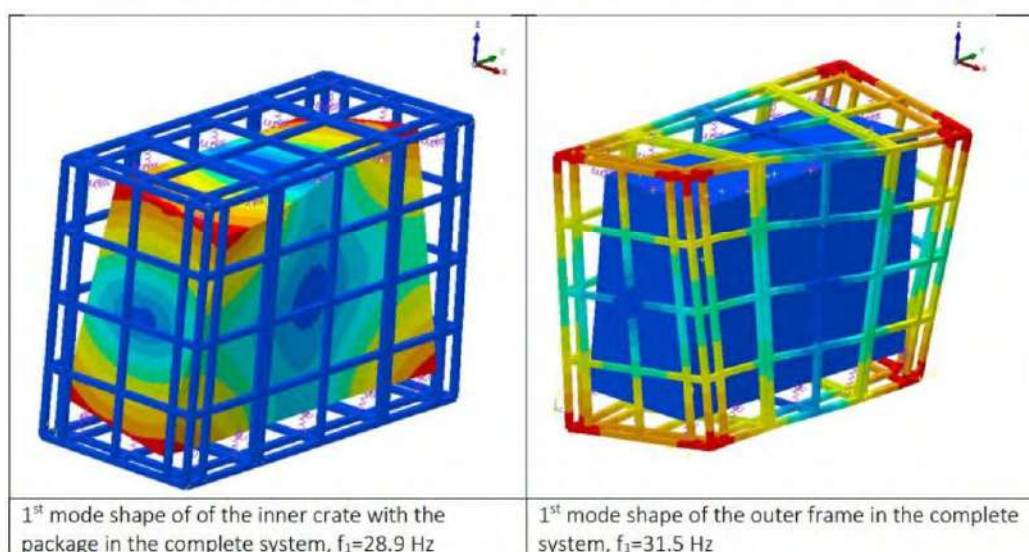


Figure 54 : Système complet : premiers modes propres de la caisse intérieure avec « emballage » et du cadre extérieur et de la caisse intérieure, calculés par éléments finis. ©HIZKIA

Le résultat de la simulation MA montre clairement que les deux sous-systèmes vibrent indépendamment selon leurs modes propres et garantissent ainsi leur découplage vibratoire.

Conclusion : le nombre et la position des amortisseurs de vibrations sont ajustés afin de minimiser l'amplitude maximale des vibrations. Par conséquent, 12 amortisseurs de vibrations sont recommandés pour la configuration initiale des essais tests.

3.2.4. Etat de l'art sur les performances des systèmes antivibratoires

Pour ce projet, nous avons sollicité notre experte en vibrations afin de comparer tous les systèmes mentionnés dans l'appel d'offres public et de sélectionner le système le plus performant pour concevoir une caisse optimale pour la protection de la Tapisserie lors de son transport.

En principe, des éléments élastiques tels que des amortisseurs en élastomère, des butées en caoutchouc-métal (comme les modèles Radiaflex 521711 et Paulstradyn 533713 demandés), des ressorts hélicoïdaux, des ressorts à lames, des ressorts pneumatiques ou des WRI, ainsi que des tapis en mousse de polyuréthane, sont utilisés pour le montage des systèmes mécaniques, assurant ainsi leur isolation vibratoire et/ou leur absorption des chocs.

Chaque type d'élément élastique possède une application spécifique. Les butées en caoutchouc-métal sont particulièrement utilisées pour le montage de moteurs, de ventilateurs et autres machines tournantes, les tapis en mousse pour le montage d'éléments ferroviaires et les ressorts

hélicoïdaux pour le montage de systèmes de climatisation et d'objets sensibles/instruments de mesure dans les bâtiments.

Pour le transport d'objets sensibles, tels que des œuvres d'art et des biens culturels, on utilise des éléments élastiques dotés d'une capacité de déformation exceptionnelle sous choc. Ceci est dû à l'amortissement nécessaire des vibrations à basse fréquence, qui transforme les impacts violents en légers balancements latéraux tout en prévenant les phénomènes de résonance lors d'une exposition prolongée aux vibrations. Contrairement aux amortisseurs caoutchouc-métal et à tous les autres types d'éléments élastiques mentionnés, les WRI sont les seuls à garantir cette performance sur les six degrés de liberté (trois de translation et trois de rotation).

D'autres avantages du WRI par rapport aux autres éléments sont indispensables pour le transport d'objets fragiles :

- Des fréquences naturelles très basses sont possibles, permettant un réglage précis à basse fréquence, et une taille compacte pour une excellente isolation.
- Le facteur d'amplification est environ trois fois supérieur à l'excitation ; l'amplitude des vibrations diminue donc rapidement après un choc, assurant une bonne stabilité des éléments supportés.
- Les surcharges dynamiques n'affectent pas la rigidité du ressort. Les isolateurs à câble restent ainsi pleinement fonctionnels même après avoir été soumis à des charges extrêmes.
- Excellente résistance aux influences environnementales.

3.2.5. Tests en laboratoire de la performance vibratoire du système de transfert et de sa caisse

3.2.5.1. *Test du système de transfert*

Pour vérifier la validité de nos hypothèses sous-jacentes à la conception, une méta-analyse a été réalisée. Les dix plus petites fréquences naturelles du système de transfert sont listées ci-dessous :

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nat. Frequ. in Hz	6.5	14.9	17	19.4	19.9	22.5	24.7	26.3	30	33.9

Les trois premiers modes de forme correspondent à des modes de corps rigide de la caisse interne. Cela signifie que le cadre interne ne se déforme pas jusqu'à une fréquence de 30 Hz. Cependant, le troisième mode de forme présente, dans une faible mesure, le mode de vibration des plaques de recouvrement de l'ensemble.

Le facteur de transfert maximal a été mesuré au centre des plaques de recouvrement et est de 0,0051 g/N.

Le déplacement sur chariots a induit une accélération absolue maximale de $|a| = 0,07$ g au niveau de la plaque de recouvrement, et le levage à la grue manuelle a induit une accélération absolue maximale de $|a| = 0,19$ g.

L'ensemble est soumis à des vibrations lors des déplacements et des levages sur toute la plage de fréquences de 1,5 à 70 Hz pendant le processus d'assemblage.

Le processus d'assemblage avec la caisse externe et le WRI a ensuite été suivi. À cette fin, un accéléromètre a été collé au centre de la plaque de recouvrement sur l'une de ses faces latérales. Les séquences du processus d'assemblage sont illustrées dans la Figure 55.

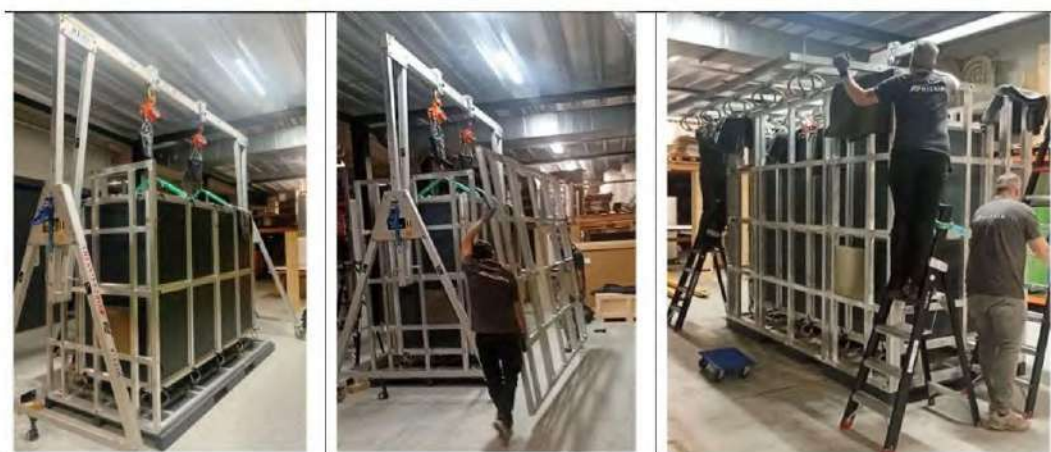


Figure 55 : Tests sur la caisse externe. ©HIZKIA

Durant tout le processus d'assemblage, à l'exception de la caisse externe, une accélération absolue maximale de $|a| = 0,04$ g a été mesurée. L'assemblage de la caisse externe a engendré une accélération absolue maximale de $|a| = 0,3$ g.

Le système de transfert est soumis à des vibrations durant ce processus d'assemblage sur toute la gamme de fréquences de 1 à 320 Hz.

3.2.5.2. Série de tests : Tests de l'ensemble de la caisse HIZKIA U+

Cette série de tests comprend un test de chute (hauteur de 3 cm), un test de déplacement sur chariot et un test de transport en camion de l'ensemble de la caisse avec la caisse interne et externe, selon les combinaisons d'indices de réduction des vibrations (IRV) suivantes :

1. IRV supérieur : 10, IRV inférieur : 10 ;
2. IRV supérieur : 6, IRV inférieur : 10 ;

3. IRV supérieur : 4, IRV inférieur : 10 ;
4. IRV supérieur : 0, IRV inférieur : 10 ;
5. IRV supérieur : 0, IRV inférieur : 8 ;
6. IRV supérieur : 4, IRV inférieur : 8.

Pour déterminer le degré de réduction des vibrations, les accélérations vibratoires (ACC 2 étant le capteur de référence sur le cadre extérieur et ACC 1 le capteur de réponse sur le cadre intérieur) ont été mesurées à un angle de chaque cadre (intérieur et extérieur). La position exacte des capteurs est indiquée sur la Figure 56.

Les combinaisons WRI 1 à 4 n'ont que légèrement réduit les chocs agissant sur la caisse externe et, dans certains cas, ont même amplifié les vibrations.

Contrairement à une isolation vibratoire efficace, des fréquences vibratoires supérieures à 30 Hz ont été détectées sur le système de transfert. De plus, une tonalité grave, semblable à celle d'une membrane, était audible pendant plusieurs secondes après l'impact du cadre extérieur lors des tests de chute.

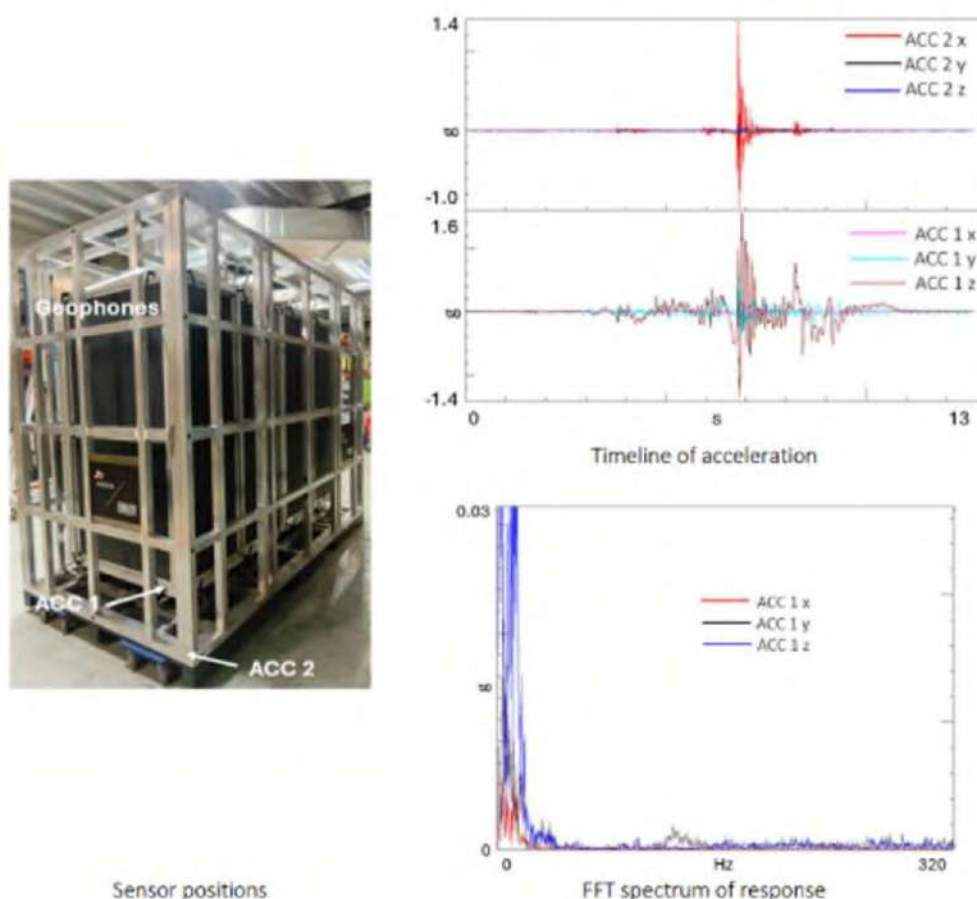


Figure 56 : Positions des capteurs et données acquises lors des tests de chutes pour le placement des WRI. ©HIZKIA

L'amortissement du bruit basse fréquence produit par les coques du système de transfert a été obtenu en fixant la palette à la caisse externe à l'aide de vis supplémentaires et en resserrant les vis utilisées pour fixer les panneaux sandwich du cadre intérieur. Ceci a été démontré par des mesures répétées de la configuration 4.

Les résultats de mesure de la combinaison 5 ont montré une réduction des vibrations de l'emballage pendant les tests de chute. Une réduction supplémentaire du nombre de WRI (unités de résistance au poids) par rapport à la configuration 5 a permis une réduction de 96 % de l'impact. Cependant, les vibrations transversales du colis restaient problématiques.

Finalement, 4 WRI ont été ajoutés en haut de la caisse interne pour améliorer le guidage de du système de transfert.

La configuration 6 : 4 WRI supérieurs et 8 WRI inférieurs, a été choisie.

Remarques concernant la réduction des vibrations de la caisse

Le niveau de protection offert par la caisse dépend de la force de la secousse. Sur l'ensemble d'un trajet, la réduction maximale est atteinte lors des secousses les plus fortes : la caisse absorbe 96 % de la force d'un choc (pour les chocs dépassant 2 g) et 93 % de la force des vibrations (pour les vibrations dépassant 4 g).

Pour les secousses plus légères (en dessous ces seuils), l'atténuation reste excellente : 91 % pour les chocs, et entre 65 % et 88 % pour les vibrations (cette fourchette s'explique par la réaction de l'emballage intérieur face à la caisse).

Le comportement exceptionnel de la caisse face à la "résonance"

Tout objet ou système possède des "fréquences critiques" (ici entre 1,9 Hz et 9,4 Hz). En général, lorsqu'un système de transport est secoué à ces fréquences précises, le mouvement s'amplifie (c'est la résonance). L'atout majeur de la caisse HIZKIA U+ est son système de suspension à câbles : il a un comportement "non-linéaire", ce qui signifie qu'il est auto-stabilisant. Au lieu d'amplifier les secousses lors de ces fréquences critiques, le système s'adapte et parvient tout de même à réduire l'impact d'environ 10 %.

L'atténuation sur les hautes fréquences (jusqu'à 200 Hz ou 500 Hz)

La caisse est conçue pour gérer les vibrations problématiques, mais il faut savoir que les camions utilisés filtrent déjà naturellement les très hautes fréquences. L'énergie transmise au-delà de 200 Hz est infime (c'est un simple bruit de fond). On le voit très bien sur la Figure 88 : les vibrations

mesurées au-dessus de 100 Hz sont 100 fois plus faibles que celles en dessous de 100 Hz. Le danger à ces fréquences est donc naturellement écarté par le véhicule lui-même.

4. Protocole de mesures vibratoires

Les transports tests et à blanc visent à mesurer et analyser les sollicitations vibratoires (et climatiques) susceptibles d'affecter la Tapisserie lors des essais de transport (trajet Bayeux–Londres), afin d'aboutir à des protocoles validés et à l'évaluation de systèmes d'amortissement. Le protocole avait été établi lors du transport à blanc de février. Etant donné son efficacité dans la réponse aux questions techniques de ce marché, le même protocole de mesure a été suivi en avril.

La rédaction et la mise en œuvre du protocole de mesures relèvent de SMACH, avec l'appui des conservateurs-restaurateurs / préventistes, et une coordination logistique avec HIZKIA (transport, caisse, camion) et Atelier Tournillon (manutention, système de transfert).

Tout au long du transport (depuis la fermeture des capots du paravents à l'ouverture de la caisse jusqu'à Londres), un convoyeur SMACH documente chaque étape, par horodatage, photographie et vidéo. Cela permet de corréler les événements mesurés par les différents capteurs et la réalité du transport (transfert de charge, changement de qualité de route, etc.)

4.1. Sélection des grandeurs à mesurer

Les grandeurs suivies et horodatées couvrent : vibrations (accélération triaxiale), chocs, température, humidité relative, pression pour qualifier l'environnement mécanique et les phases opérationnelles.

Capteurs mobilisés (annexes 8.2) :

- 8 capteurs StarRT (SMACH) : accéléromètre triaxial haute sensibilité (+ température + HR + journal d'événements.
- 1 capteur MSR175 : accéléromètre triaxial (chocs) + température + HR + pression

Les fiches techniques des capteurs sont en Annexes 8.2.

4.2. Emplacement de la mesure

Le protocole doit définir les points de mesure sur dans le camion - caisse HIZKIA U+ et, dans la caisse interne - paravent, ainsi que les paramètres de suivi.

4.2.1. Dans le camion

Objectif : caractériser l'excitation d'entrée (profil vibratoire et événements) au plus près de la caisse et documenter l'influence de l'emplacement de la caisse et du mode de fixation/calage dans la semi-remorque. Le mémoire précise que l'emplacement optimal dans le camion est

recherché pour minimiser les vibrations, et que le camion d'essai est climatisé et équipé (suspension, arrimages, hayon 2T, etc.).

Ces mesures ont été préalablement imaginées et effectuées par l'équipe de HIZKIA (voir chapitre 3.2.2)

4.2.2. Dans la caisse HIZKIA U+ / caisse externe

L'objectif est de quantifier la transmissibilité de la caisse externe à la caisse interne puis vers le paravent/panneau instrumenté. Le protocole s'inscrit explicitement dans une démarche d'évaluation des dispositifs antivibratoires.

Implantation :

- 1 capteur GPS coté cabine convoyeur (mesure GPS précise) ;
- 6 capteurs vibration / HR / T dans le système de transfert, dont 5 sur un même panneau (no 2) et 1 sur un deuxième panneau (no 27), 2 placés en regards des deux panneaux instrumentés, en-dehors sur la caisse interne ;
- 1 capteur de chocs / HR/ T / pression sur la caisse externe.

Dans le contexte de cette étude, notre équipe ne peut pas mesurer la réponse vibratoire de chaque panneau, qui sont au nombre de 28. L'idée est de cartographier les deux premiers modes propres d'un panneau en posant 5 capteurs et de comprendre la fonction de transfert des vibrations arrivant sur la structure et transmise à ce panneau. En position de transport, ce panneau se trouve en partie basse du paravent – au niveau du premier interstice sans Tapisserie (panneau n°2). Si nous avons la fonction de transfert sur l'extrémité haute (panneau n°27) du paravent, nous pouvons corréler le comportement du panneau à ce niveau-là. L'hypothèse étant que chaque panneau est identique d'un point de vue matériau et assemblage. Les paramètres qui changent ce sont les conditions limites liées au chargement (les vibrations d'entrée seront différentes en haut de la structure).

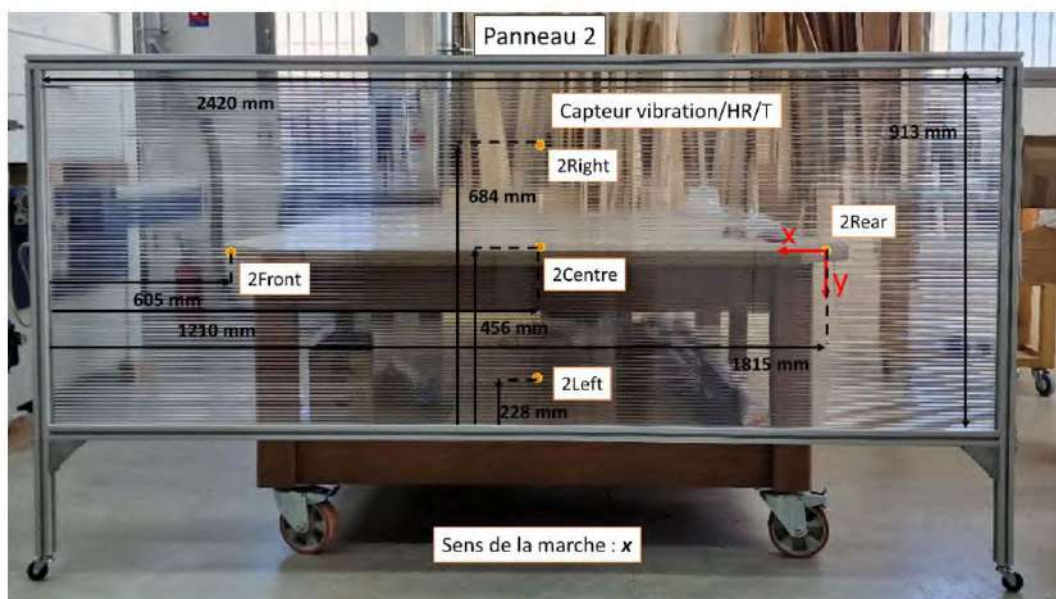


Figure 57 : Schéma d'un panneau n°2 seul, et du positionnement des capteurs. Le panneau est ici en position verticale. Lors du transport, le panneau est en position horizontale. X correspond à la direction du mouvement du paravent. La direction z est la direction verticale. L'emplacement des capteurs vibration/HR/T est représenté par des points orange-jaune. ©SMACH

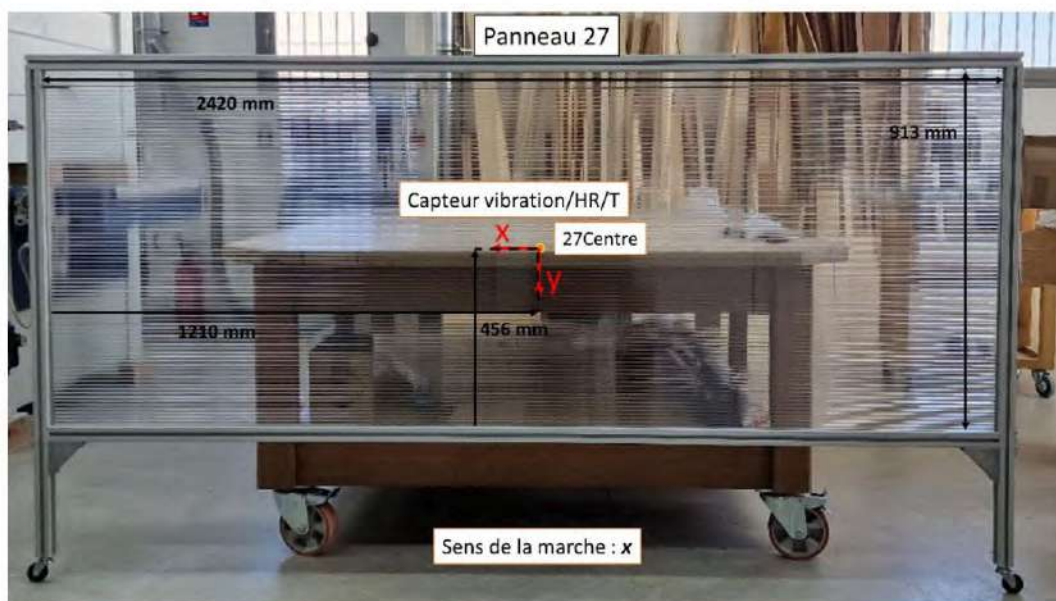


Figure 58 : Schéma d'un panneau n°27 seul, et du positionnement des capteurs. Le panneau est ici en position verticale. Lors du transport, le panneau est en position horizontale. X correspond à la direction du mouvement du paravent. La direction z est la direction verticale. L'emplacement des capteurs vibration/HR/T est représenté par des points orange-jaune. ©SMACH

Les directions, présentées dans nos figures, sont les directions des accéléromètres qui sont triaxiaux. La direction de marche, soit la direction de mouvement du camion en roulement est dans la direction x de ces accéléromètres.

Lors du transport de février 2026, les capteurs étaient accrochés à la plaque de polycarbonate et la caisse interne grâce à de la cire microcristalline. Lors du transport d'avril, la fixation s'est faite plus solidement par le vissage des capteurs sur la plaque de polycarbonate, tout en gardant la cire microcristalline sur la caisse interne.

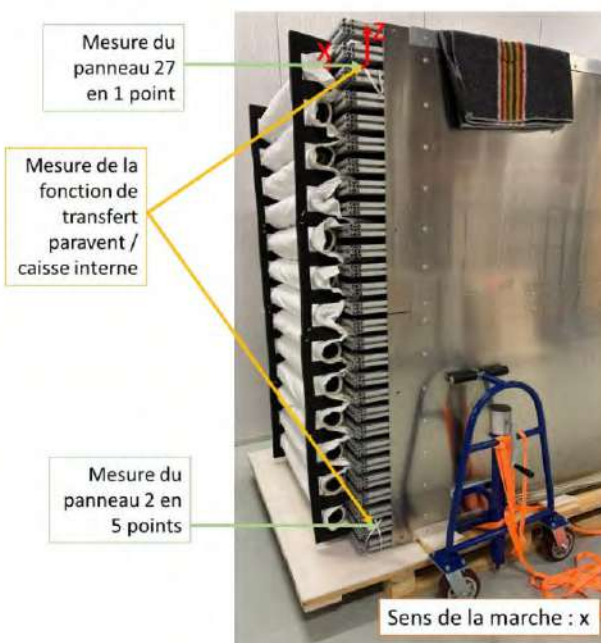


Figure 59 : positionnement des capteurs vibration/HR/T dans le paravent. Le sens de la marche est suivant la direction x. ©SMACH

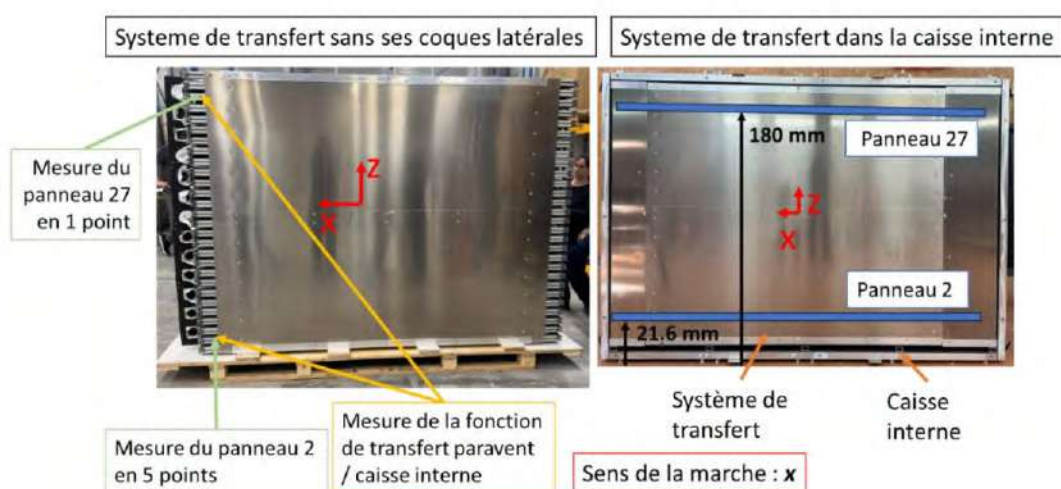


Figure 60 : positionnement des capteurs vibration/HR/T sur le paravent. Sens de la marche dans la direction x. ©SMACH

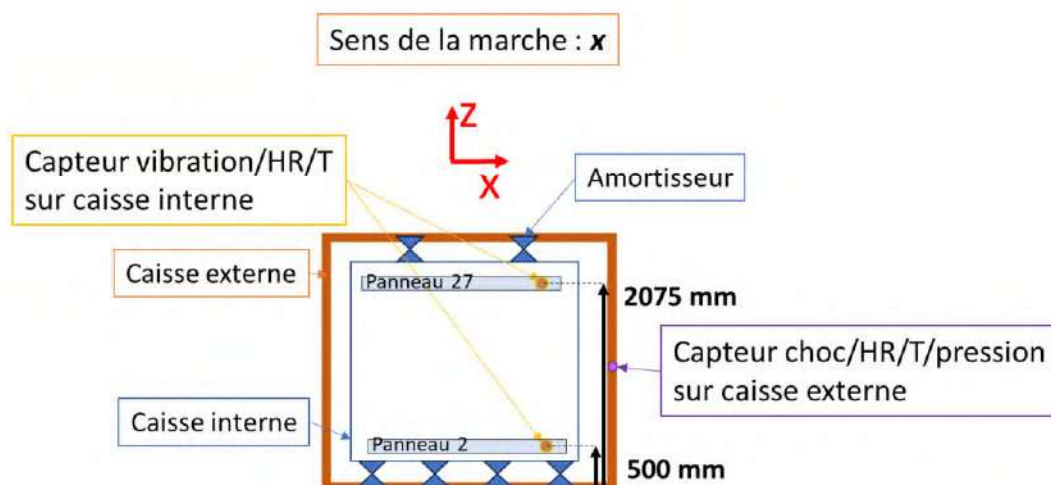


Figure 61 : Caisse HIZKIA U+ .Positionnement en hauteur des capteurs vibration/HR/T sur la caisse interne. Sens de la marche dans la direction x . ©SMACH

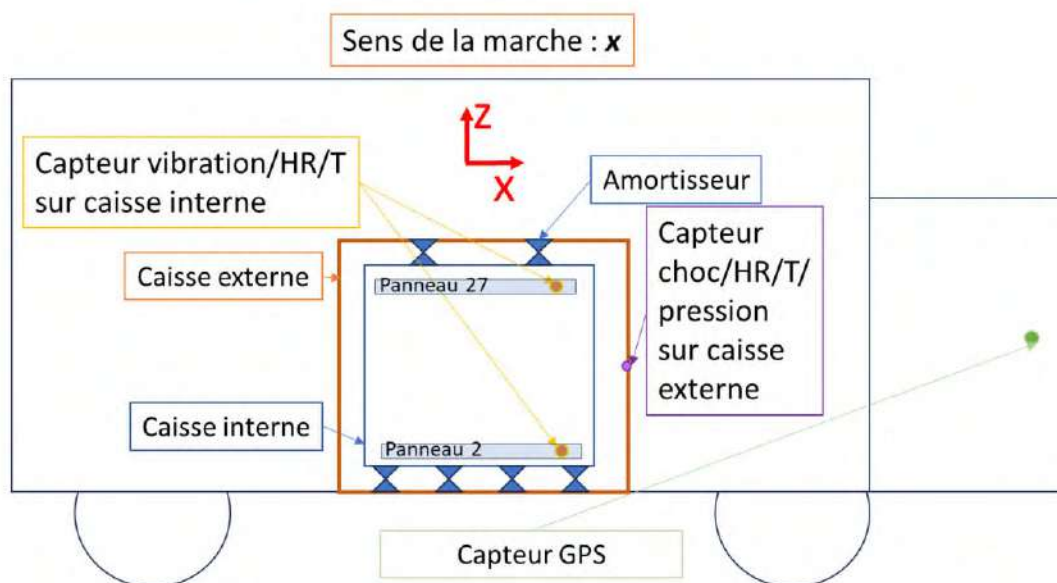


Figure 62 : Schéma de placement des capteurs dans le camion. Le sens de la marche est dans la direction x . ©SMACH.

Tous les autres capteurs sont orientés avec le plan (x,y) horizontal et l'axe z verticalement. Le sens de la marche est lui suivant x pour tous les capteurs.

4.3. Paramétrages des capteurs

Les capteurs vibrations/HR/T sont paramétrés avec une fréquence d'acquisition de 13.000 Hz pour l'accéléromètre à $\pm 2g$ et toutes les 10 min pour l'humidité et la température. Toutes les données sont enregistrées localement sur la mémoire des capteurs. La communication à distance avec ces capteurs est possible par connexion Bluetooth lors du dépassement de seuils. Lors du dépassement de seuil, un message d'alerte est envoyé à l'opérateur avec un point GPS associé.

Les capteurs chocs/HR/T/pression sont paramétrés avec une fréquence d'acquisition de 1.600 Hz pour l'accéléromètre à $\pm 15g$ et toutes les 10 min pour l'humidité, la température et la pression. Toutes les données sont enregistrées localement sur la mémoire des capteurs.

5. Convoiement et étape des transports

Cette partie fait la synthèse utile des deux transports effectués : le transport test de février 2026 Bayeux-Londres-Bayeux et le voyage à blanc d'avril 2026 Bayeux-British Museum (Londres).

5.1. Installation des capteurs dans le système de transfert dans les locaux techniques de la ville de Bayeux

Au matin du jour 1, la caisse externe, la caisse interne et le paravent ont été sortis du camion par 4 agents HIZKIA.

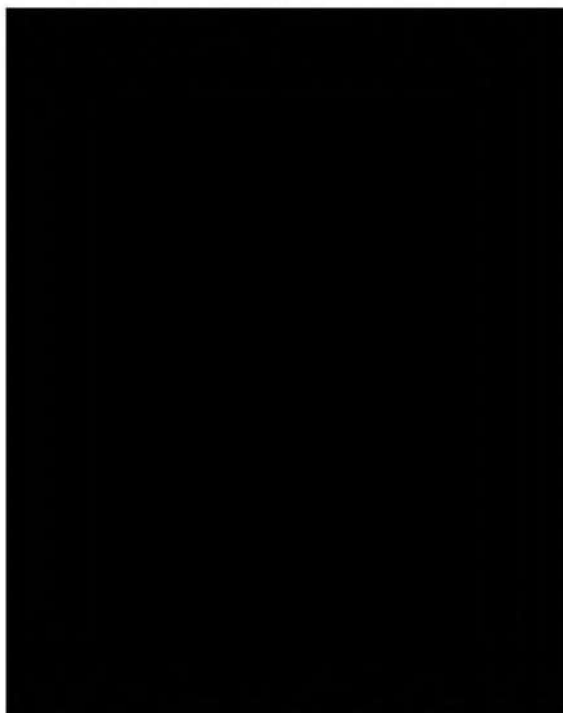


Figure 63 : Déchargement de la caisse HIZKIA U+ par les opérateurs HIZKIA et documentation par l'équipe SMACH. Trajet de février 2026. ©SMACH

Une fois à l'intérieur du local, la caisse externe a été démontée par l'équipe HIZKIA. Le retrait du panneau inférieur a nécessité la mise en place d'un portique capable de soulever la caisse interne pour déconnecter les amortisseurs. L'expérience acquise par les manipulateurs au cours des essais précédents, dans les locaux HIZKIA, a permis une mise en œuvre rapide et précise. Cela a démontré l'importance de l'intervention d'équipes formées à la construction de cette caisse, qui demeure très technique.

Tous les panneaux de la caisse interne ont alors été retirés par les manipulateurs HIZKIA. Le portique a été à nouveau utilisé pour soulever le paravent et dégager le panneau inférieur. Une fois le paravent dégagé, l'ensemble des pieds a été fixé par l'équipe Atelier Tournillon (2 opérateurs).

Pour le retournement du paravent (position horizontale à verticale), l'expérience acquise auprès des manipulations précédentes et de l'extraction a été précieuse. Cette étape s'est déroulée de façon fluide et précise, avec 4 manipulateurs HIZKIA. Les 2 capots et 2 coques en aluminium ont été dévissés par 2 opérateurs Atelier Tournillon, avec l'assistance des manipulateurs HIZKIA.

Les capteurs décrits dans le protocole ont alors pu être attachés au sein du paravent par l'équipe SMACH (3 opérateurs). L'utilisation de la technologie StaRT a permis de paramétrer et mettre en veille l'ensemble des 8 capteurs vibration/T/HR déployés sur le paravent et la caisse interne. Les 2 capots en aluminium ont été placés autour du paravent pour le consolider.



Figure 64 : Installation des 5 capteurs StaRT sur le panneau 2 par un opérateur SMACH. Trajet de février 2026. ©SMACH

A l'aide du portique, le paravent a alors été basculé en position horizontale, et les pieds ont été retirés. La communication avec les capteurs n'a pas été interrompue par cette étape.

La hauteur minimale du portique doit être de 3,80 m hors tout afin de réaliser toutes les opérations de la caisse HIZKIA U+.

5.2. Transfert du paravent vers les réserves de la Tapisserie de Bayeux pour une mise en caisse en situation réelle

La première étape a été de démarrer les capteurs qui sont déployés pour ce transport. Cela a été fait alors que paravent était en position horizontale, avec le commencement de l'horodatage du transport par 1 opérateur SMACH.



Figure 65 : Convoyeur SMACH documentant chaque étape du transport pour calibration des capteurs. Trajet de février 2026. ©SMACH

Les capots ont pu être remis en place par 2 opérateurs Atelier Tournillon. Les autres panneaux composant la caisse interne ont ensuite été mis en place par les 4 opérateurs HIZKIA.

Une fois le paravent transporté par camion HIZKIA aux réserves de la Tapisserie, les opérateurs HIZKIA ont mis en place leur matériel nécessaire à la mise en caisse sur la plateforme de manipulation.



Figure 66 : Manipulateurs HIZKIA installant le portique de levage sur la plateforme de manipulation installée en face des réserves de la Tapisserie. Trajet d'avril 2026. ©SMACH

Le fond de la caisse interne HIZKIA U+ est préinstallé dans les réserves, plus exactement dans le SAS Liberté pour un transfert de fond de caisse entre l'existant (résultant du précédent transfert de la Tapisserie aux réserves) et la caisse de transport international HIZKIA U+. L'équipe se met en situation réelle : mise en caisse interne dans les réserves actuelles et caisse externe sous la tente thermo-hygro régulée.

La situation des réserves étant très exiguë, un nombre très limité de personnes peuvent être présent dans les réserves : les 4 manipulateurs HIZKIA et 2 personnes de contrôle des opérations (1 personne DRAC et 1 personne British Museum).

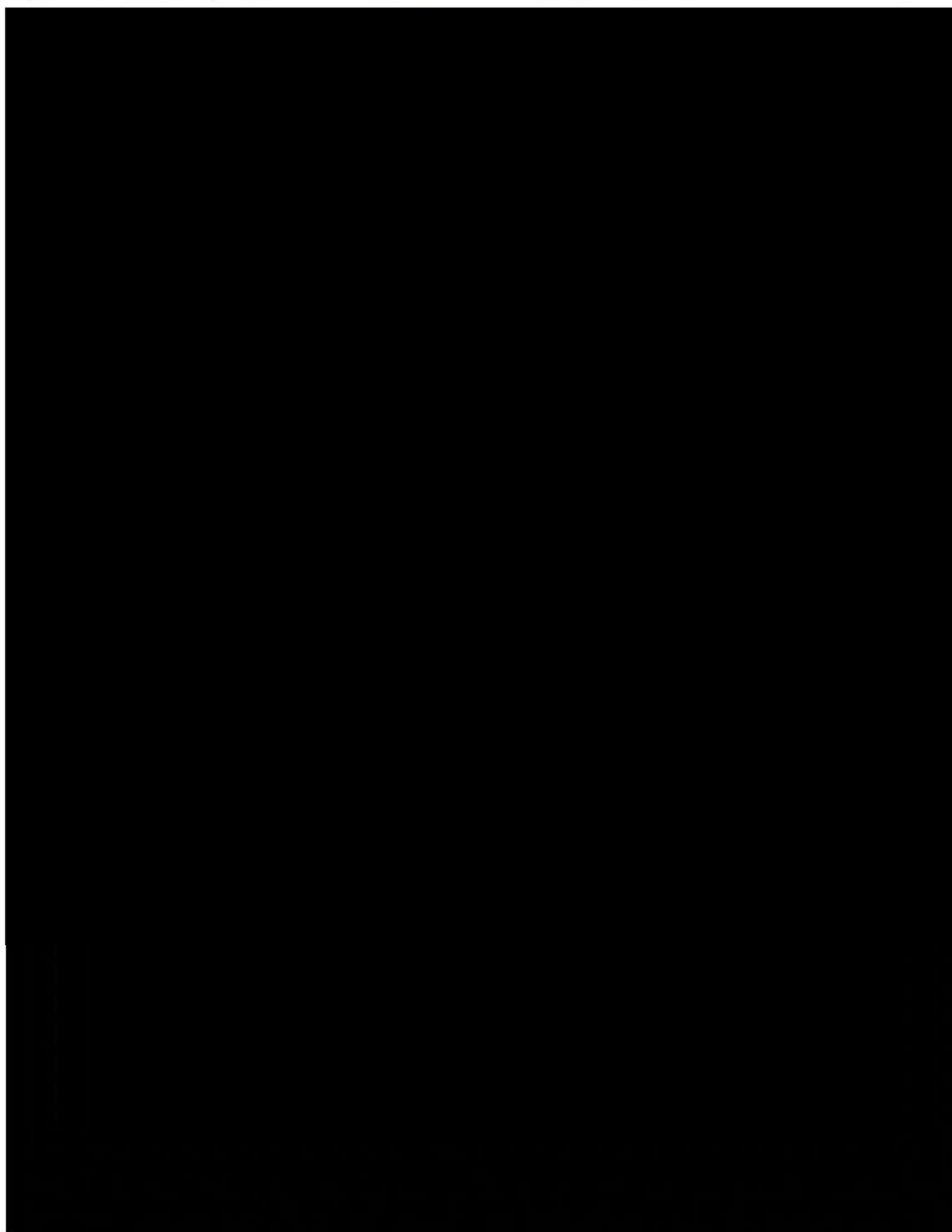


Une fois la caisse interne HIZKIA U+ montée dans le SAS Liberté, les portes sont ouvertes et la caisse interne est transférée sur la plateforme.

La caisse interne a été soulevée à l'aide du portique et de 4 opérateurs HIZKIA. Le panneau inférieur de la caisse externe, équipé de 8 amortisseurs a ensuite été glissé sous la caisse interne à l'aide d'un transpalette. Les 4 opérateurs HIZKIA sont spécifiquement formés pour cette tâche, qui nécessite une manipulation précise du portique. Les panneaux latéraux de la caisse externe sont alors assemblés.

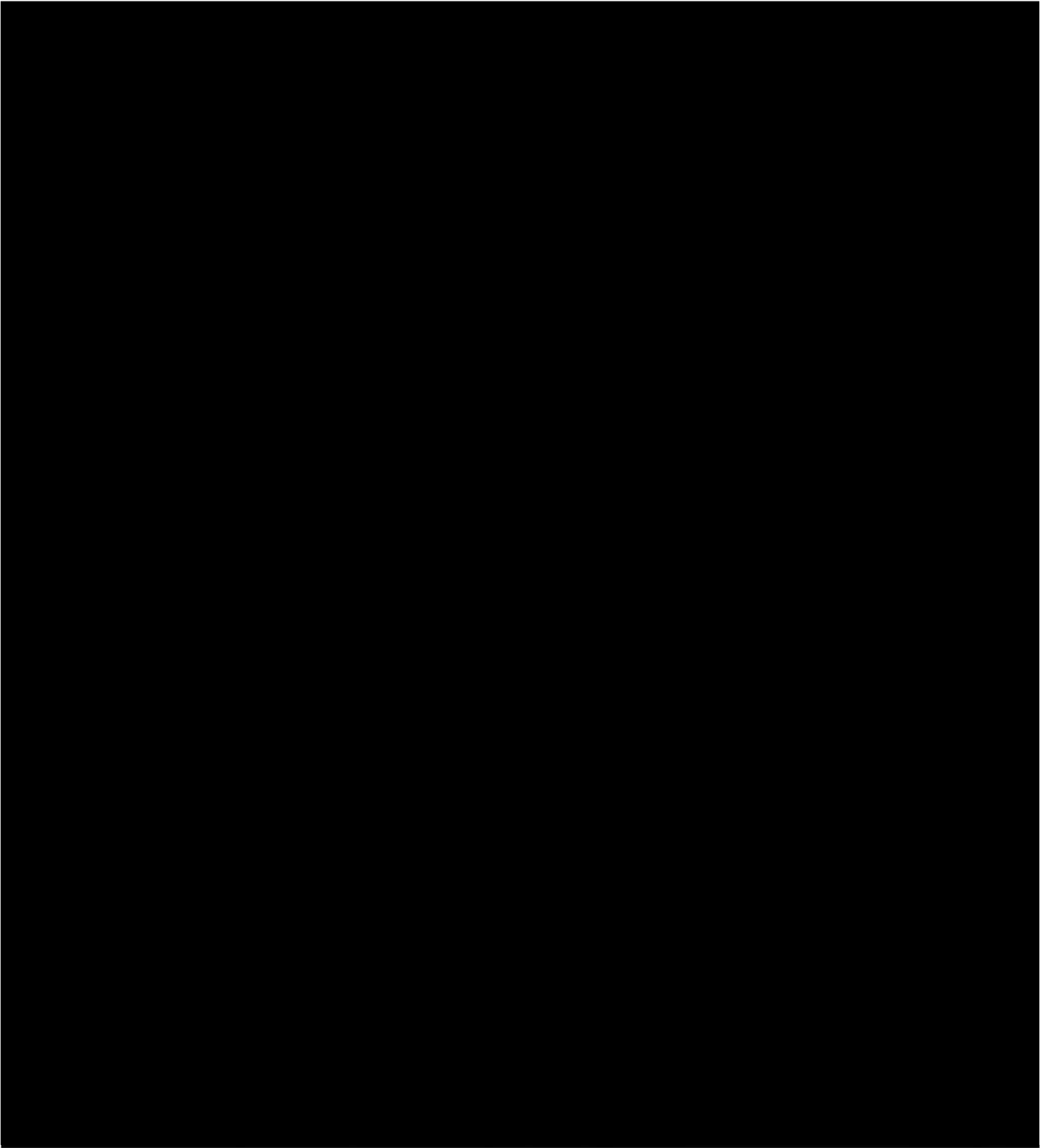
L'ensemble de la caisse a ensuite été protégé par un film étirable plastique (polyéthylène). L'ensemble a été placé d'un côté sur 2 plateaux à roulettes et l'autre (avant de la caisse) a été soulevé par un transpalette pour limiter les vibrations. Le hayon du camion est descendu à fleur de la plateforme pour une limitation des ruptures de charges.

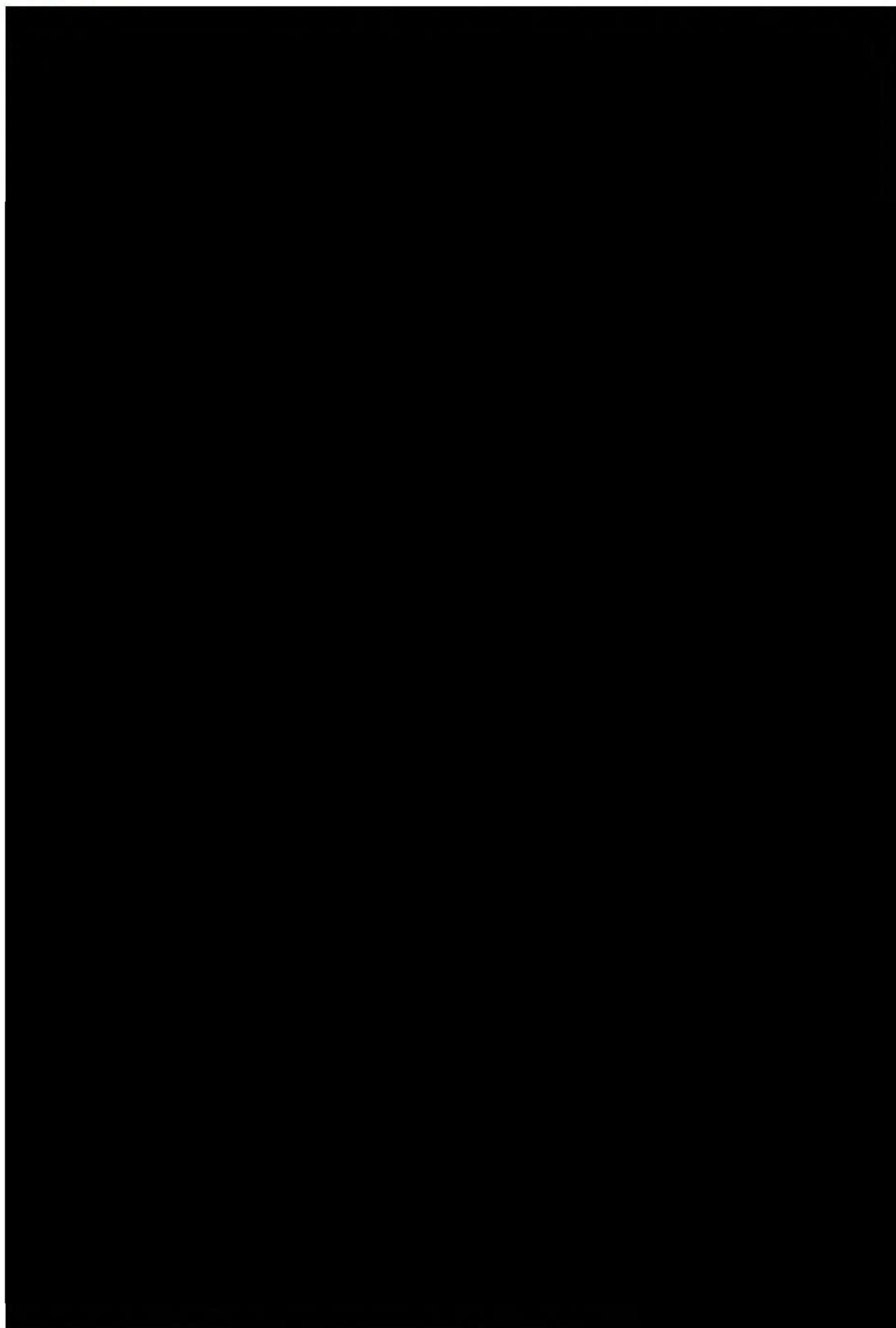
En amont du chargement, un opérateur HIZKIA a marqué l'emplacement de la caisse, au centre de la remorque, à l'aide de ruban adhésif. Pour le chargement dans le camion, la coordination des 4 opérateurs HIZKIA a été la garantie de manipulations sûres, contrôlées et une limitation des vibrations. Lorsque la caisse a été poussée dans le camion, la présence des rubans adhésifs de marquage a permis une mise en place aisée et sécurisée.

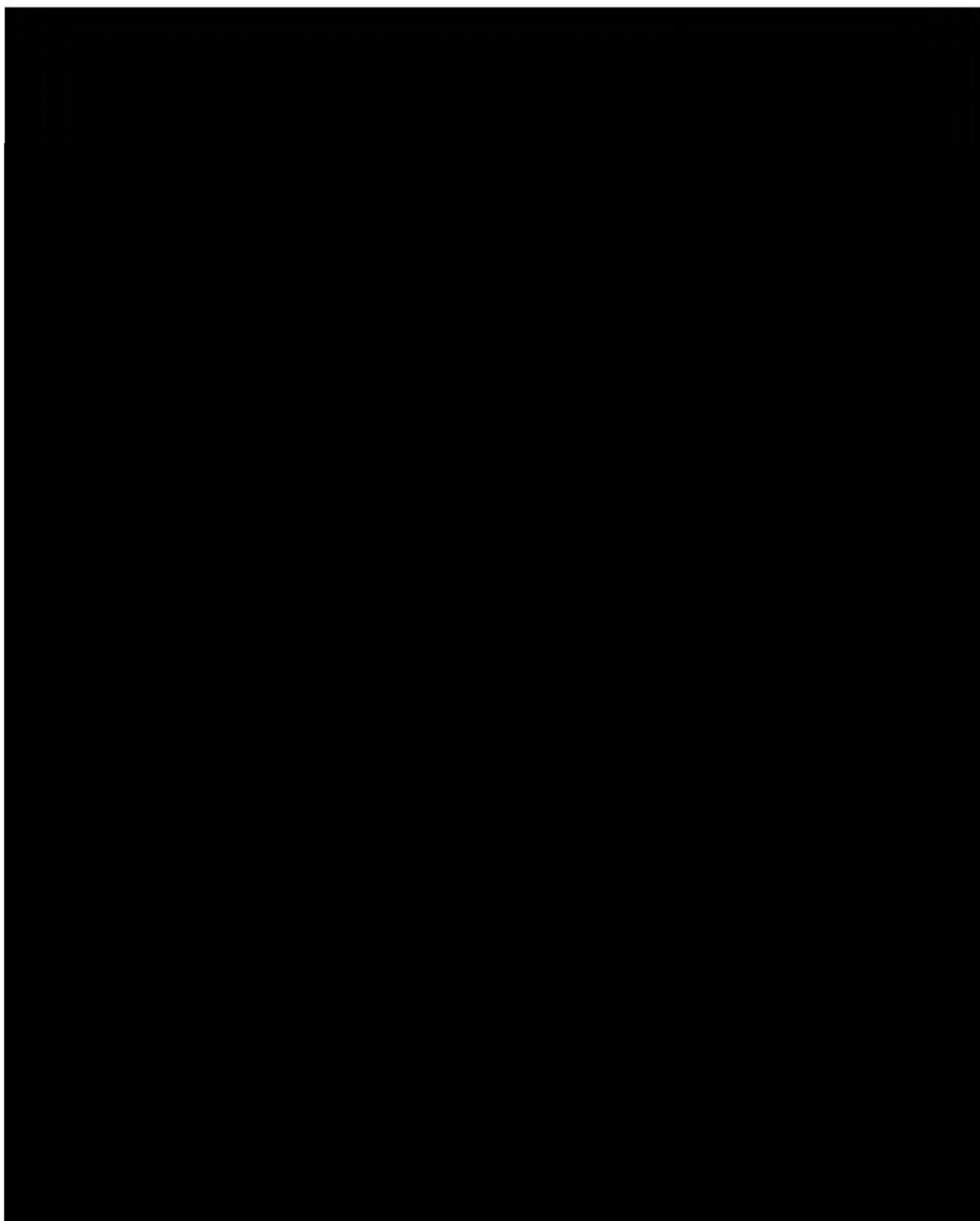


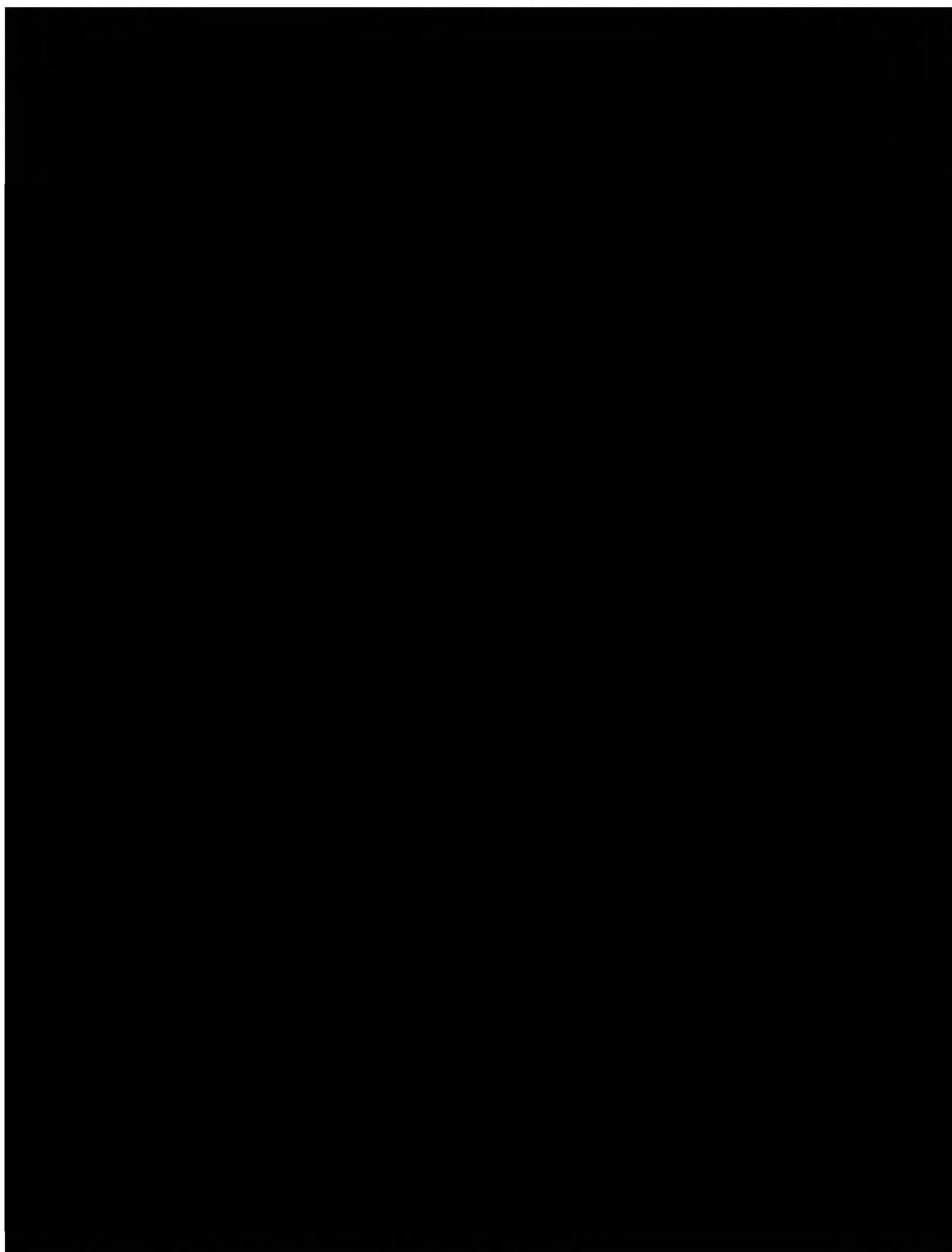
*Figure 68 : Manipulateurs HIZKIA sanglant la caisse HIZKIA U+ dans le camion. Trajet d'avril 2026.
©SMACH*

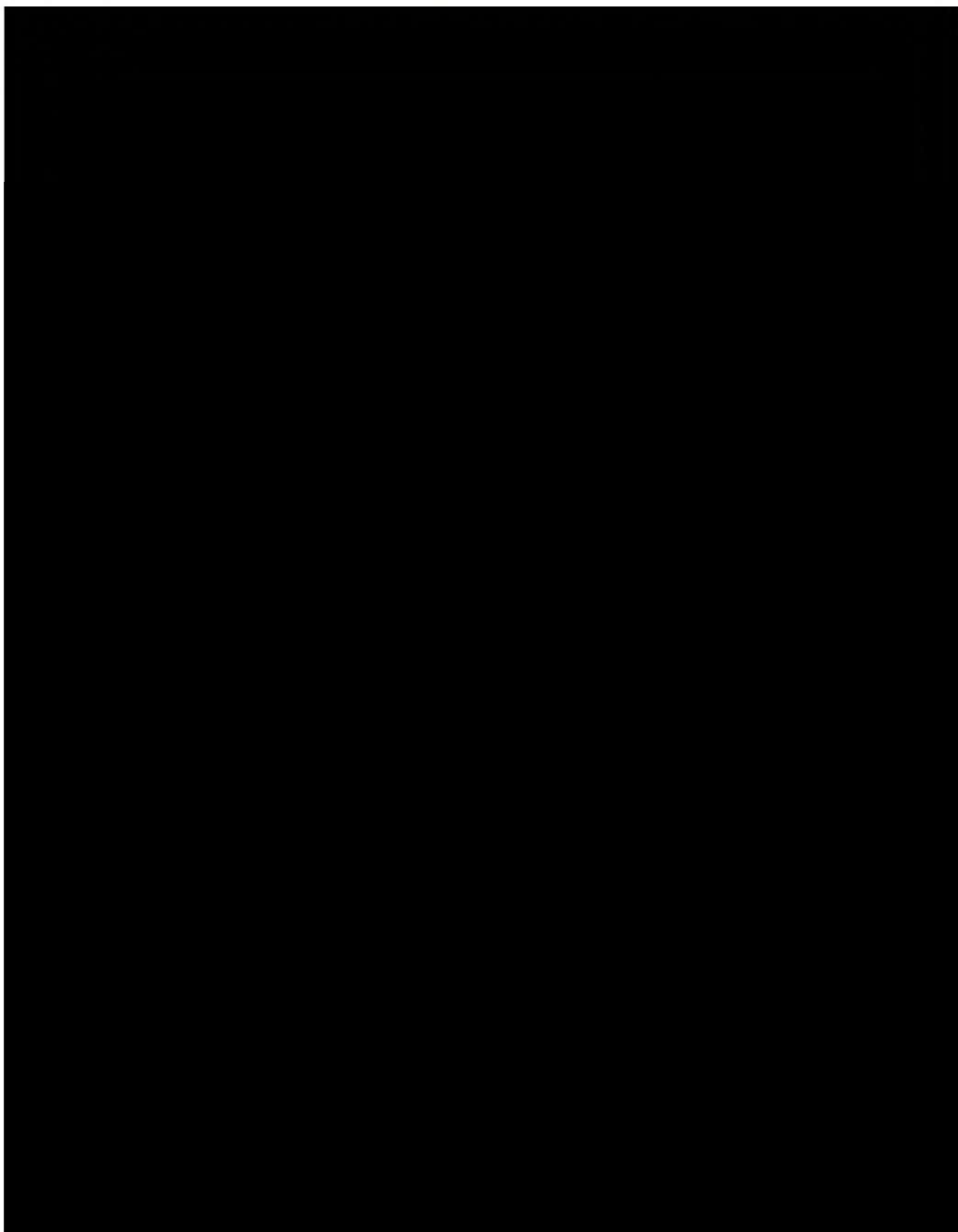
La caisse a été maintenue dans le camion à l'aide de quatre sangles connectées aux parois du camion. Cela garantit le non-mouvement de la caisse externe dans le camion pendant la conduite. Une fois la caisse solidement attachée, les portes du camion ont été fermées, et le hayon remonté. 

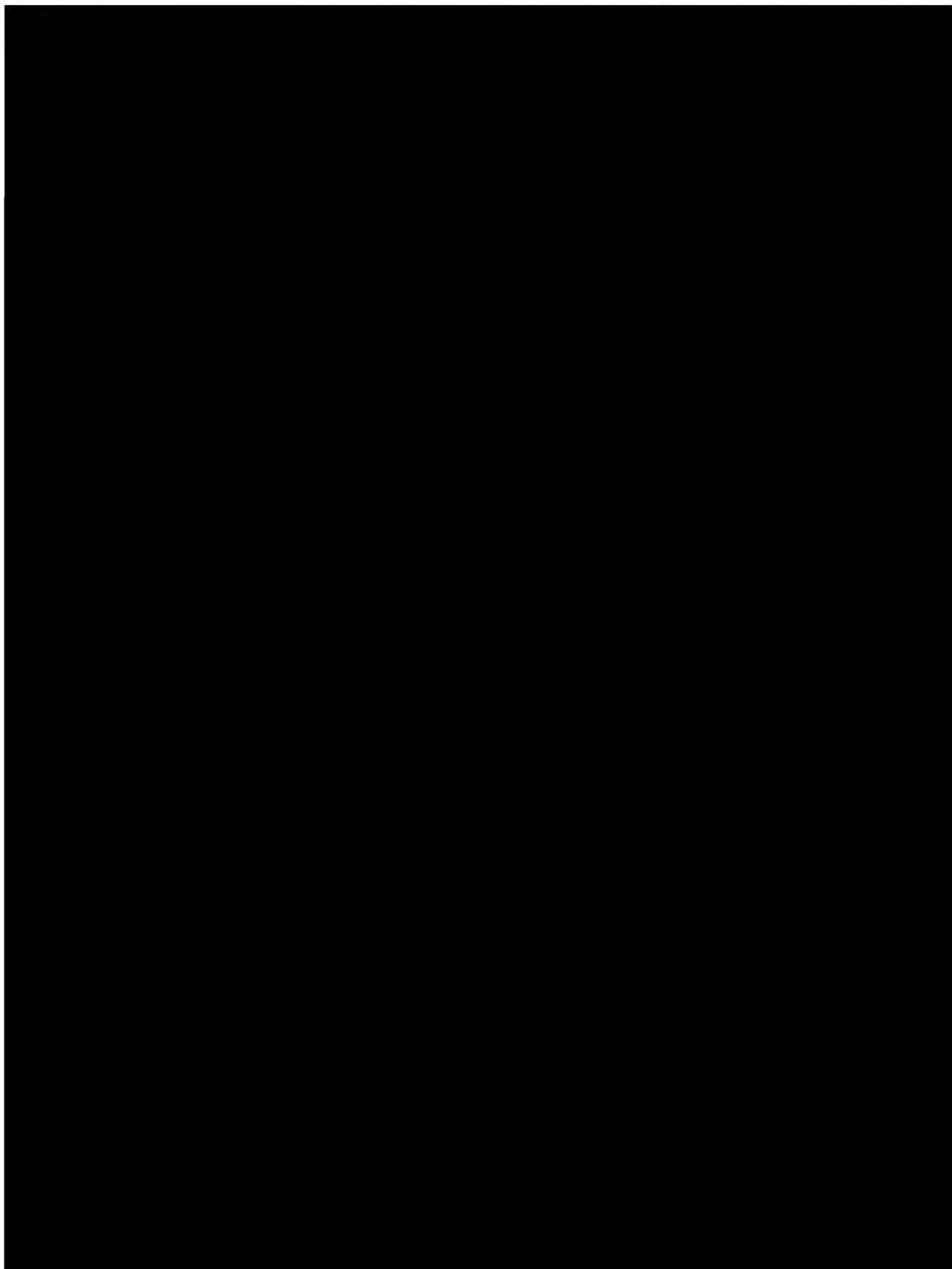


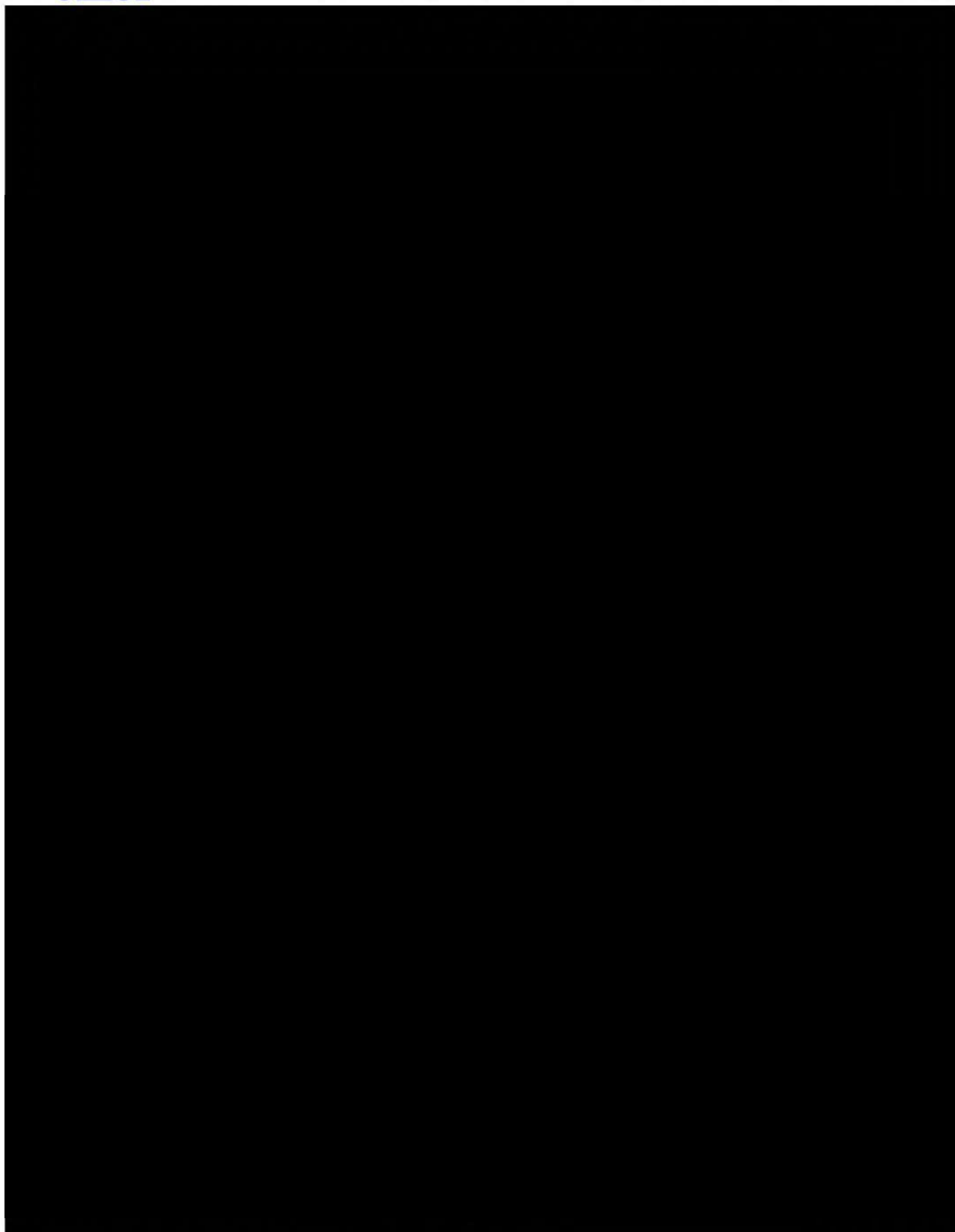


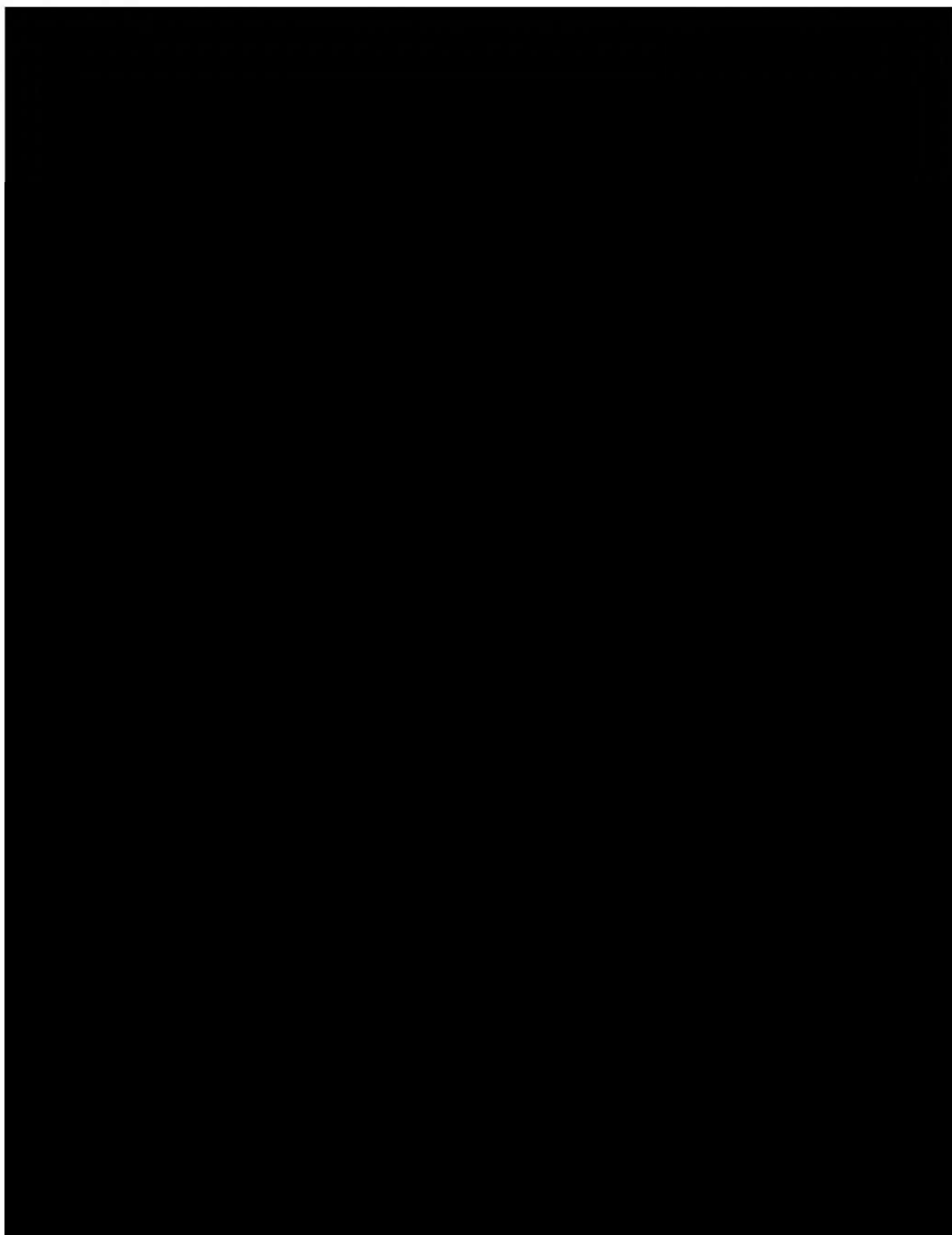


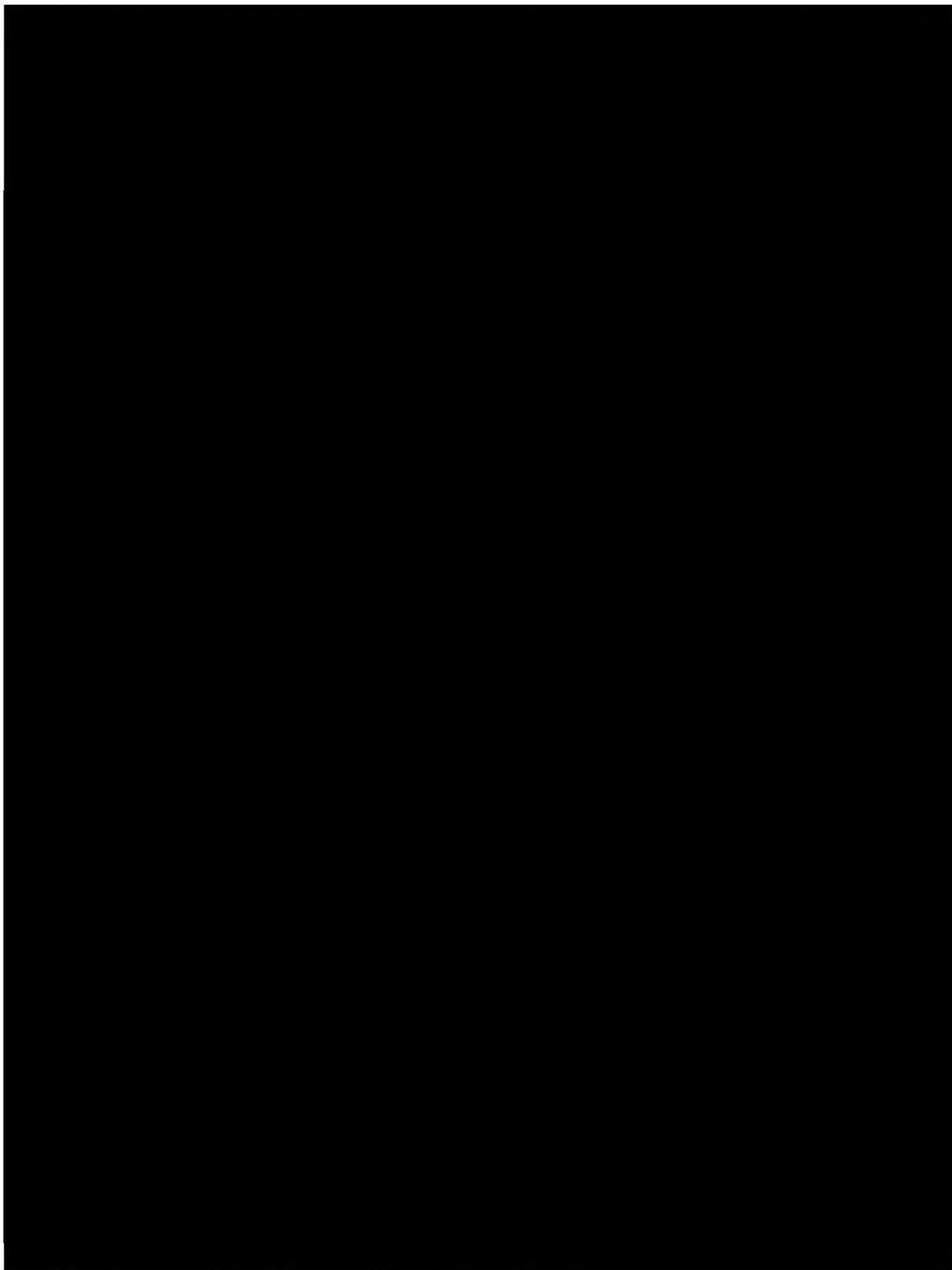


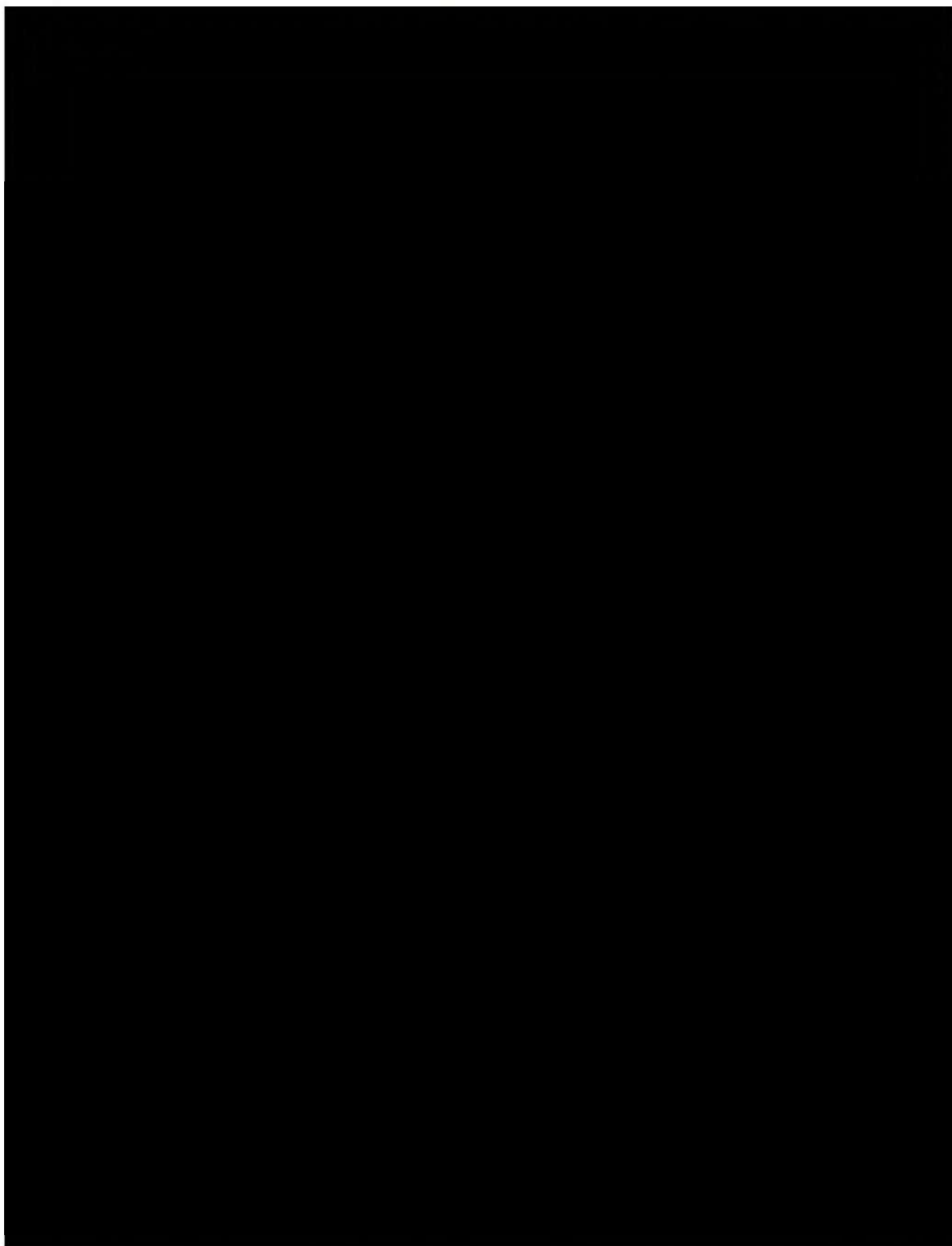


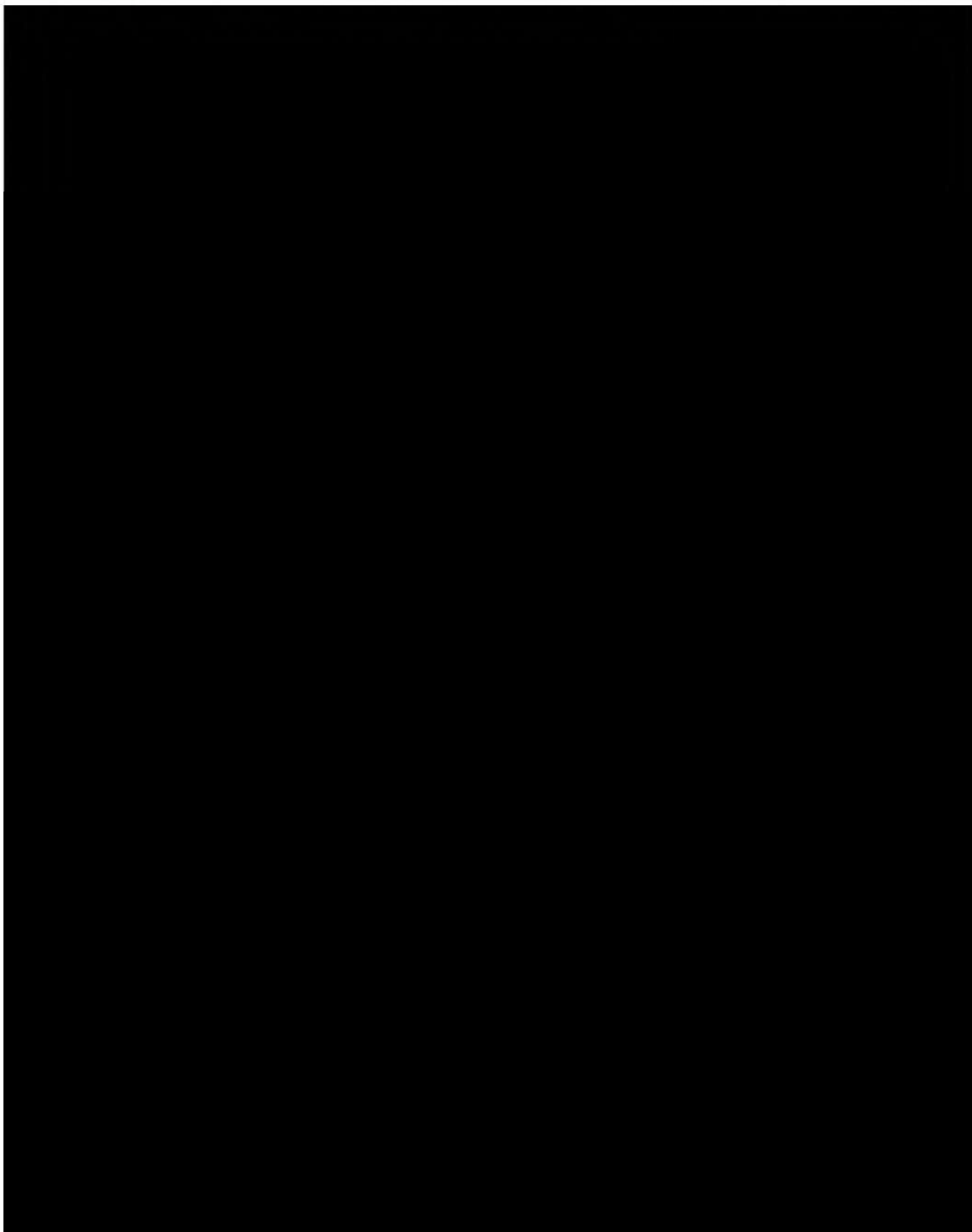


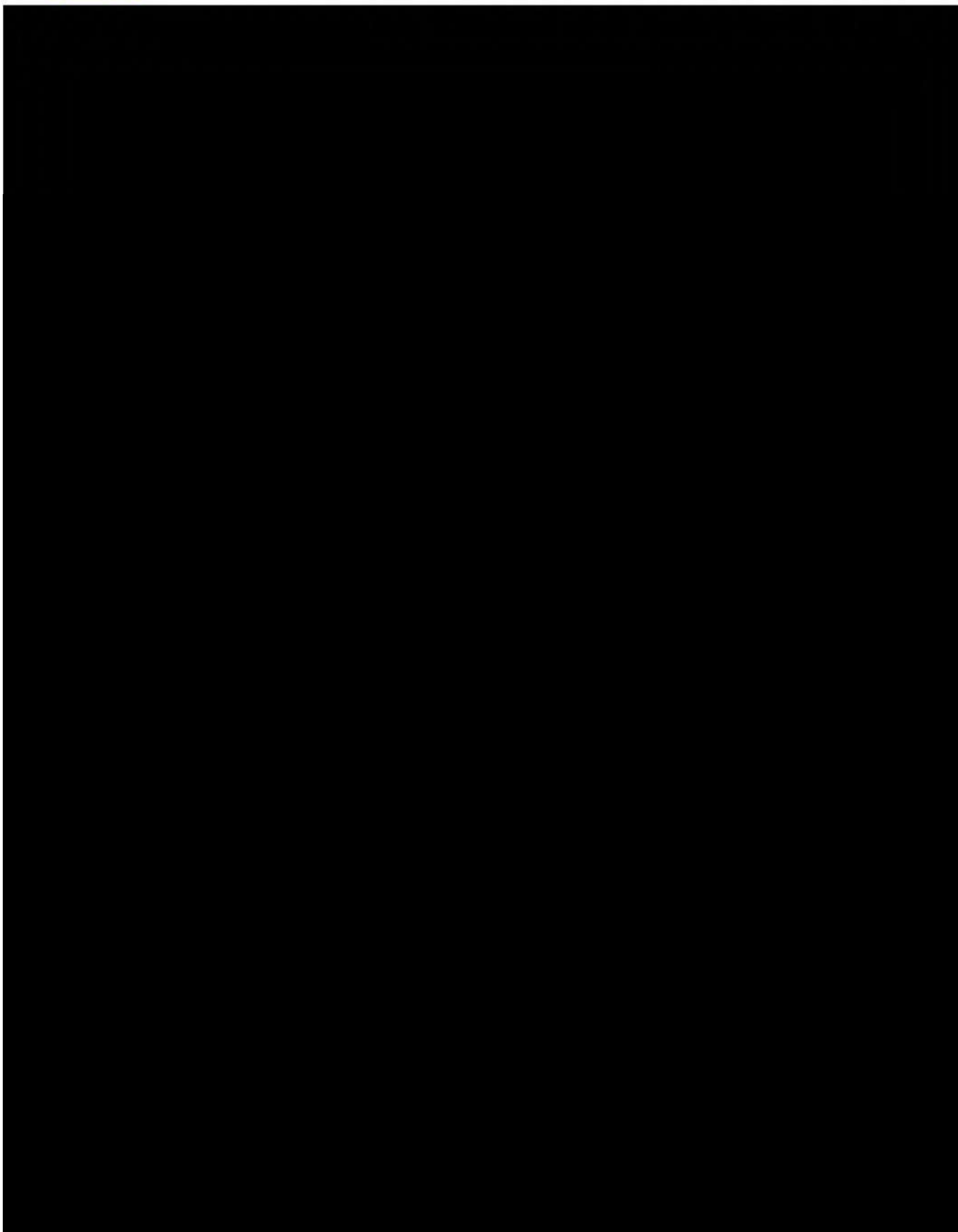


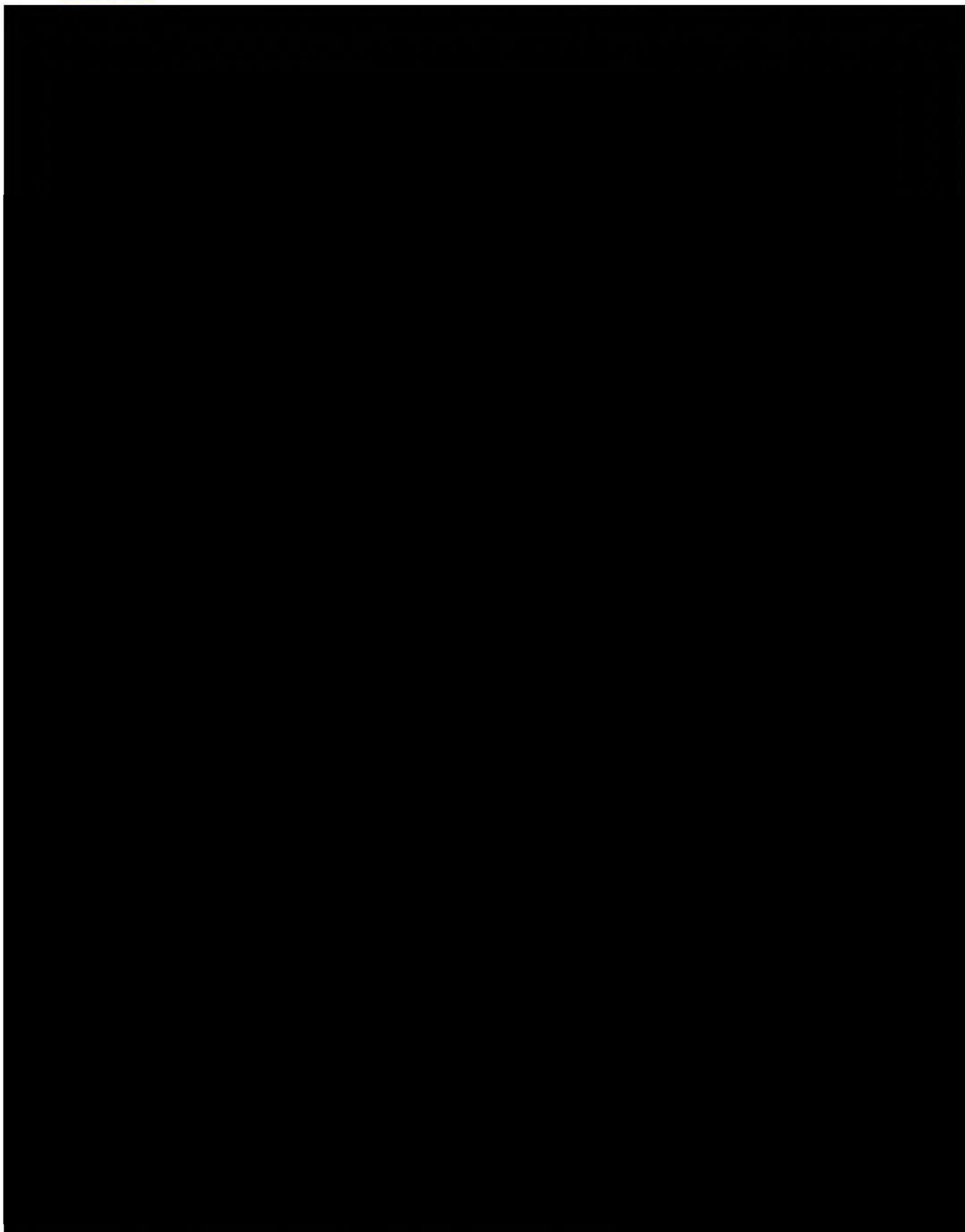






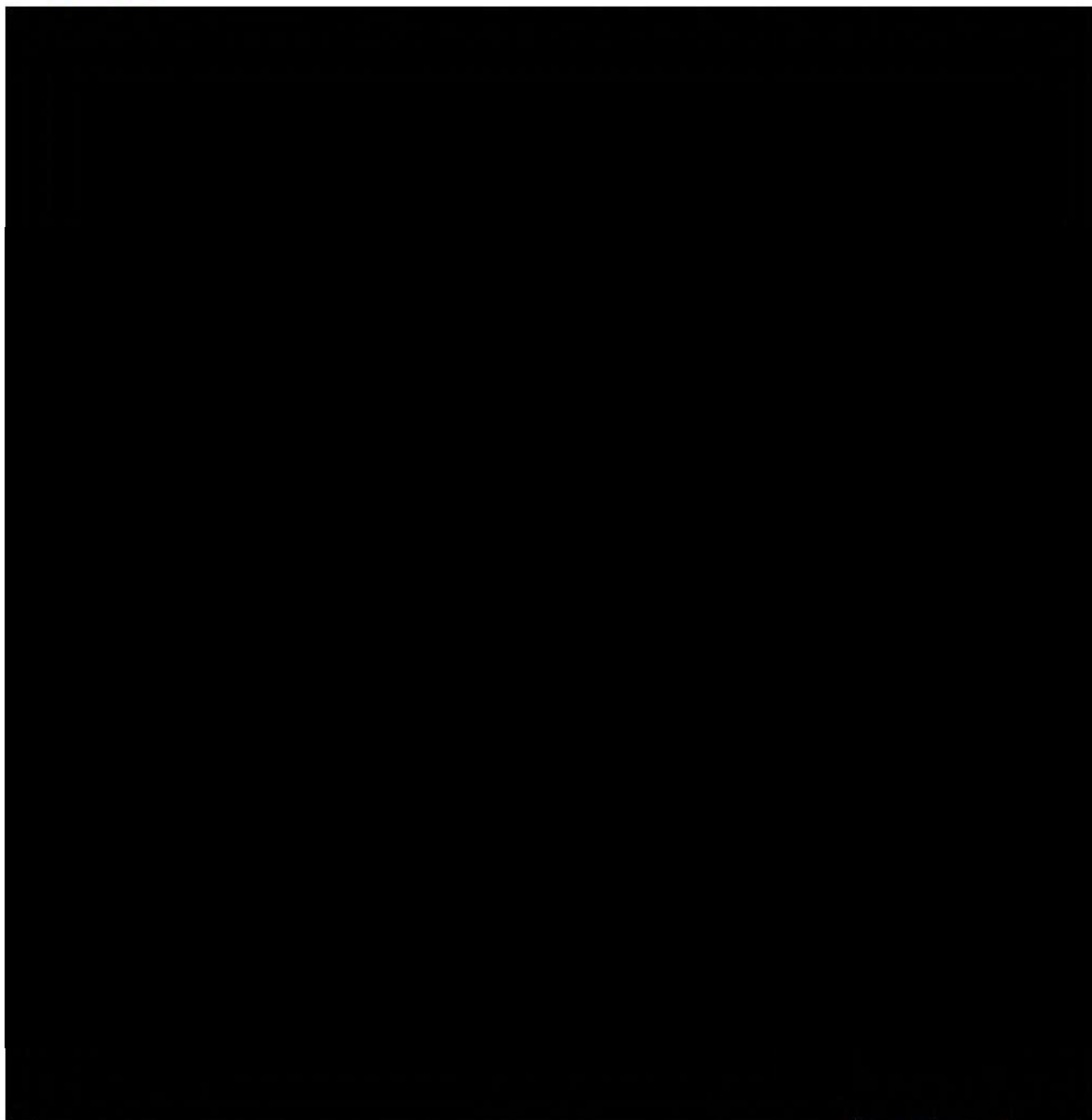






5.5. Chronogramme synthétique des opérations

Chronologie		taches communes												
13/04/2026	18:00										Arrivée des équipes HIZKIA NL & DK	Arrivée des équipes		
14/04/2026	08:00:00		Accompagnement du montage de la plateforme		Montage de la plateforme						Dechargement de la			Accompagnement du montage de la plateforme
	09:00:00										Demontage de la caisse		Test communication sur le camion	
	10:00:00											Parametrage des capteurs		
	11:00:00										Retournement du paravent			
	12:00:00	LUNCH												
	13:00:00											Montage des pieds et retraits des capots	Test communication sur le camion	
	14:00:00												Placement des capteurs sur la caisse	
	15:00:00												Fermeture des capots et Retrait des pieds	
	16:00:00											Retournement du paravent		
	17:00:00												fermeture des coques	
	18:00:00													
	//nuit//			Sécurité										



17/04/2026	08:00										Fermeture des capots	Retirer des capteurs sur la caisse	
	09:00										Retrait des pieds	Enregistrement données sur serveur	
	10:00						Retournement du paravent		Retournement du paravent				
	11:00												

6. Résultats

L'analyse suivante porte sur les données acquises lors de la première phase de test (Bayeux–Londres–Bayeux) et de la phase du voyage à blanc (Bayeux–British Museum). L'objectif est de fournir une caractérisation de l'environnement mécanique et d'évaluer la transmissibilité des vibrations depuis la caisse interne (Capteur 2Ext, voir Figure 62) vers la structure de transfert en deux points spécifiques :

- Capteur 2Centre (Panneau 2, voir Figure 57) : Point central de la partie inférieure de la structure de transfert.
- Capteur 27Centre (Panneau 27, voir Figure 58) : Point central de la partie supérieure de la structure de transfert.

Les axes x , y et z correspondent respectivement à la direction de la marche (longitudinal), au balancement latéral (transversal) et au mouvement vertical.

Nous avons estimé un léger désalignement des capteurs en tangage et en roulis de $2,7^\circ$, correspondant à un biais d'accélération de $0,14 \text{ m/s}^2$. Cette contribution est considérée comme faisant partie du bruit du signal.

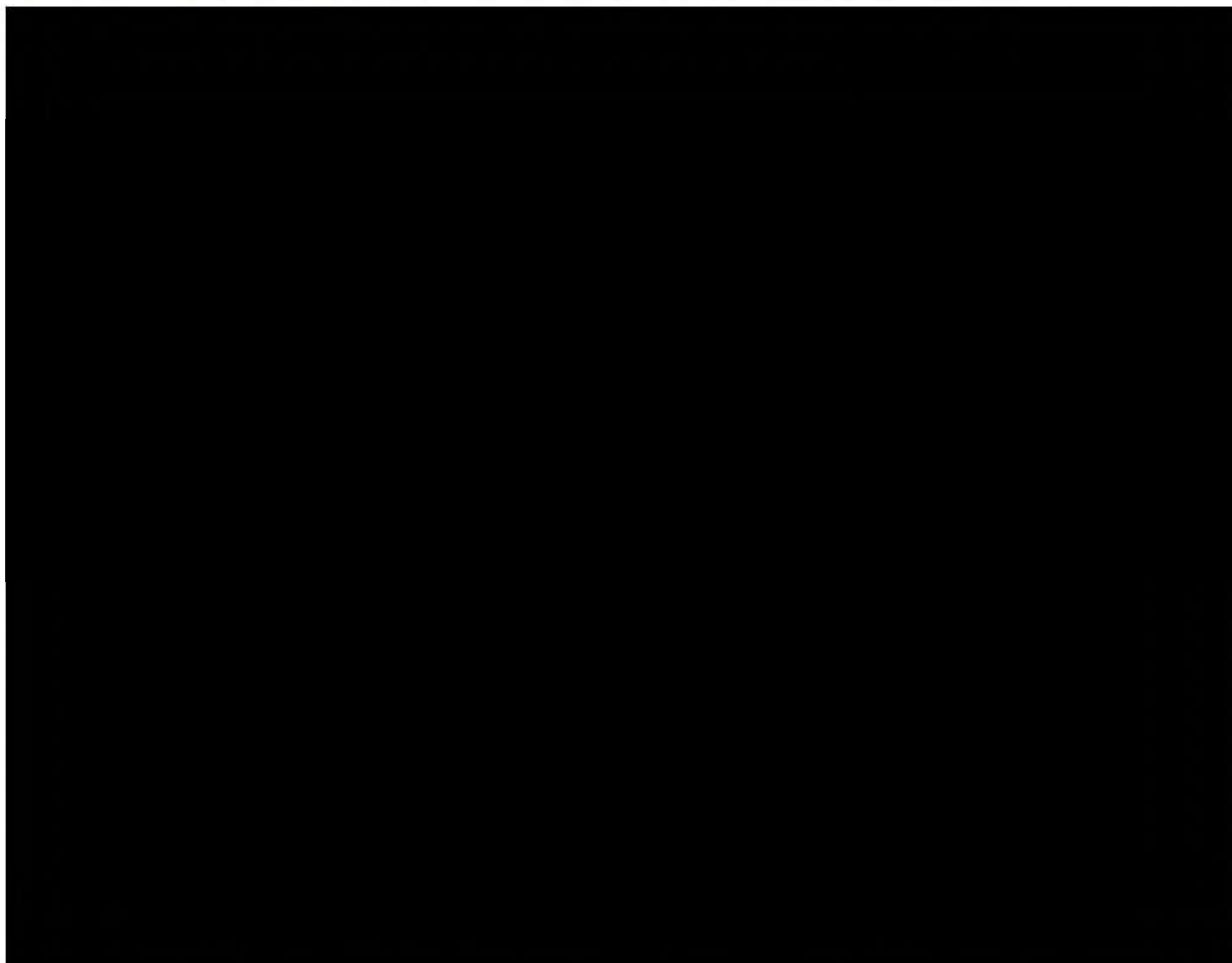
6.1. Comparaison entre la caisse interne et le panneau inférieur de la structure de transfert

Cette analyse compare le comportement vibratoire de la caisse interne (2Ext) par rapport au panneau inférieur (2Centre). Cette comparaison permet d'évaluer la réponse du système de transfert à l'excitation générée par la caisse interne. Pour toutes les sections ci-dessous, les données ont été examinées selon deux modalités :

- Domaine temporel : tracé de l'accélération mesurée (m/s^2), et la norme de l'accélération $\|a\|$ en fonction du temps.
- Domaine fréquentiel (DSP) : tracé des énergies mesurées pour chaque fréquence.

La Densité Spectrale de Puissance (DSP) décrit la répartition de l'énergie d'un signal mesuré en fonction de la fréquence. Contrairement à un tracé temporel (signal vs temps), la DSP représente la contribution de chaque composante fréquentielle au niveau global du signal. Les pics de la DSP indiquent des composantes périodiques dominantes (ex. : rotation, modes de résonance), tandis qu'une DSP plus large indique un contenu à large bande (ex. : vibrations aléatoires ou bruit). L'analyse DSP est donc utilisée pour identifier les fréquences caractéristiques, comparer les environnements vibratoires et quantifier le contenu du signal sur une bande de fréquences donnée.

Chaque analyse rapportée ici est isolée sur des durées de 30 minutes en temporel et de 2 secondes en fréquentiel, correspondant à des segments pertinents du transport :



La Figure 86 présente une superposition des courbes temporelles d'accélération triaxiale mesurées par deux capteurs (2Centre en bleu et 2Ext en orange). Les quatre graphiques empilés montrent, de haut en bas, les composantes d'accélération selon x (direction de déplacement), y (droite/gauche), z (haut/bas), ainsi que la norme de l'accélération résultante $\|a\|$ (toutes en m/s^2).



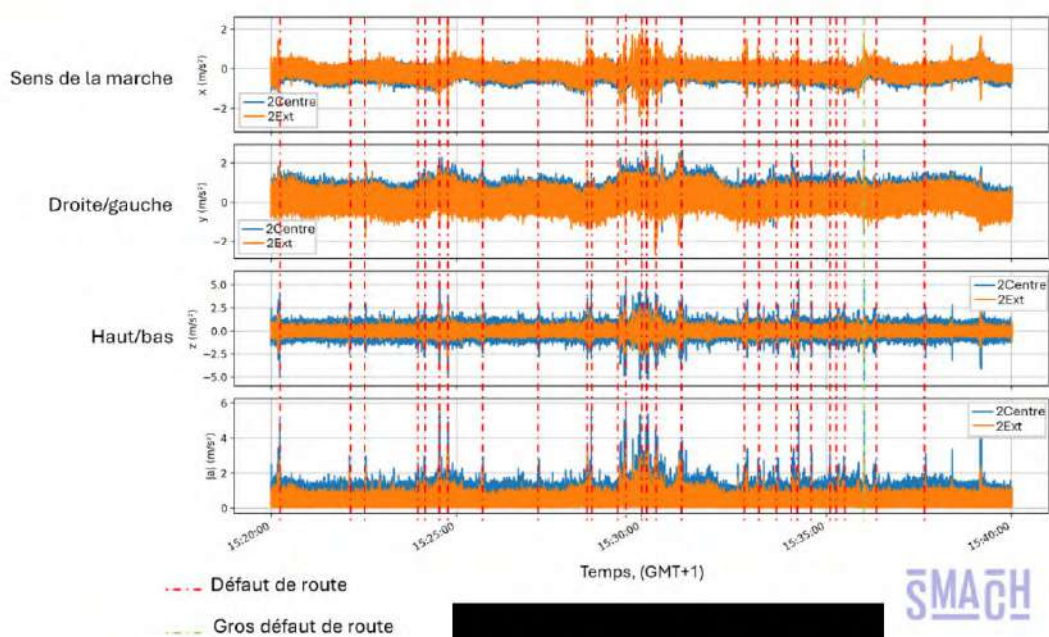


Figure 86 : Valeurs d'accélération au cours du temps sur 30 minutes sur [redacted] février 2026). Les valeurs du capteur 2Ext (caisse interne) sont tracées en orange, celles du capteur 2Centre (panneau 2) en bleu. Les défauts de la route documentés en cabine ont été corrélés sur la courbe (défauts réguliers en rouge, défauts plus importants en vert).

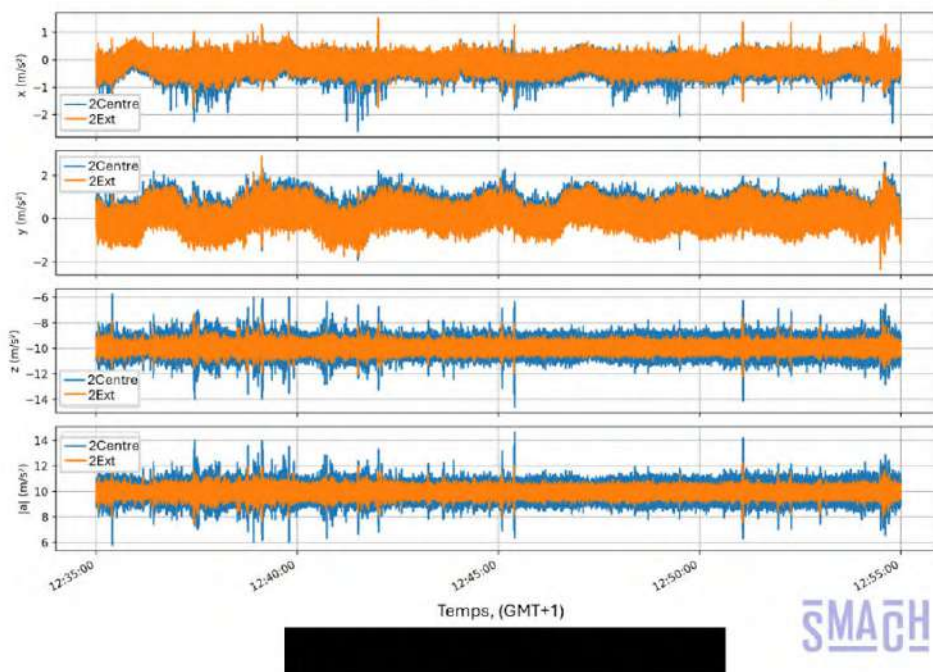


Figure 87 : Valeurs d'accélération au cours du temps sur 30 minutes sur [redacted] février 2026). Les valeurs du capteur 2Ext (caisse interne) sont tracées en orange, celles du capteur 2Centre (panneau 2) en bleu.

Figure 88 et Figure 89 présentent les résultats pour les mêmes parties du transport, aller et retour respectivement, mais dans le domaine fréquentiel.

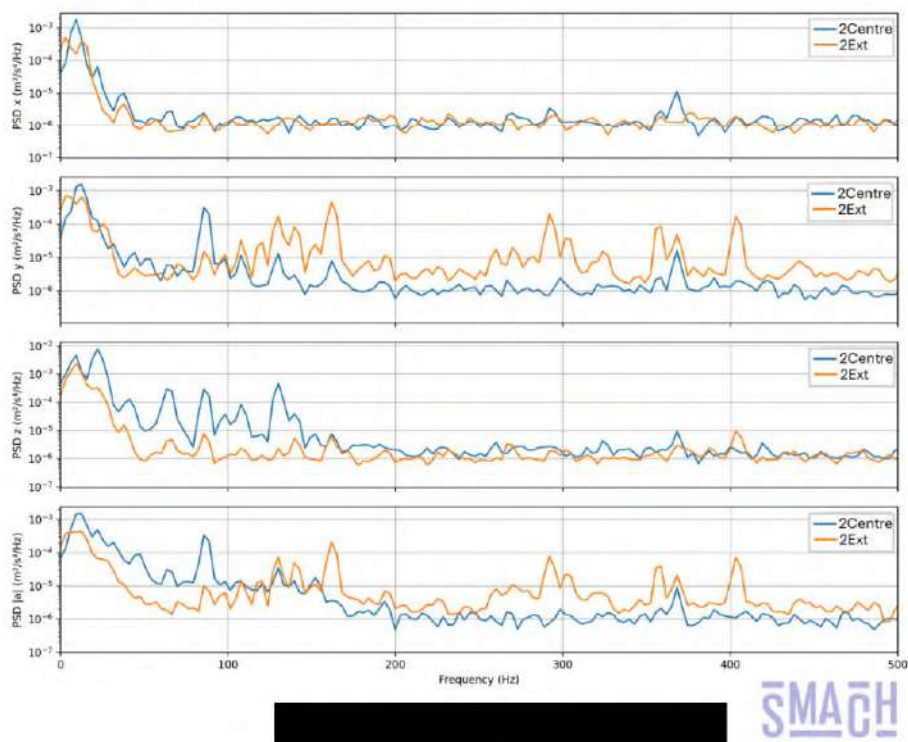


Figure 88 : Données tracées dans le domaine fréquentiel (niveaux de DSP vs fréquence) pour le trajet aller [redacted] en février 2026. Les valeurs du capteur 2Ext (caisse interne) sont tracées en orange, celles du capteur 2Centre (panneau 2) en bleu.

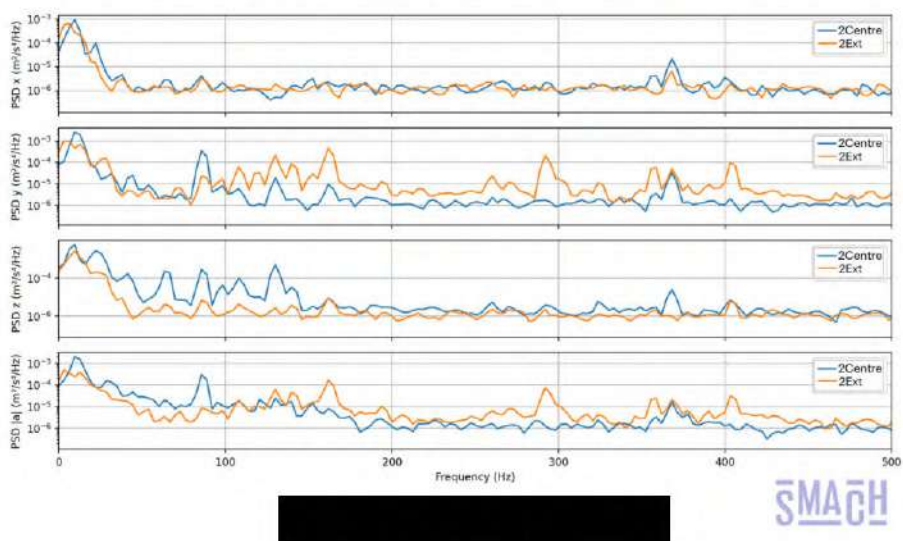


Figure 89 : Données tracées dans le domaine fréquentiel (niveaux de DSP vs fréquence) pour le trajet retour [redacted] en février 2026. Les valeurs du capteur 2Ext (caisse interne) sont tracées en orange, celles du capteur 2Centre (panneau 2) en bleu

Tout d’abord, les données temporelles indiquent une forte corrélation entre la caisse interne (2Ext) et le panneau 2 (2Centre). La réponse structurelle du panneau 2 reproduit l’excitation de la caisse interne, suggérant un couplage rigide entre le bas du paravent et la base de la caisse interne. Les ruptures de charge qui correspondent aux défauts de la route sont visibles tant au niveau de la caisse interne que du panneau 2 (Figure 86). En outre, il est notable que les amplitudes des accélérations sont légèrement amplifiées au niveau du paravent.

Dans le domaine fréquentiel (Figure 88 et Figure 89), les résultats pour l’aller et le retour sont similaires. L’analyse DSP révèle que la majorité de l’énergie vibratoire est concentrée en dessous de 160 Hz. Cela est en concordance avec les publications du domaine sur le transport routier.

La caisse interne (2Ext) et le panneau 2 (2Centre) présentent des pics différents, qui leur sont propres. Ces pics sont à la même fréquence pour les deux figures, donc pour on peut considérer qu’ils sont la signature de la réponse fréquentielle de la caisse interne et du panneau 2 à l’. Pour la caisse interne, les principaux pics d’énergie se situent vers 10, 20 puis 160 Hz. Pour le panneau 2, autour de 15, 30, 80 et 140 Hz selon les directions. Ces résultats démontrent bien la réponse dynamique du paravent pendant le transport. Au sein du paravent, les panneaux de polycarbonate ne sont pas fixés rigidement dans la structure métallique. Ils coulissent dans le profilé en aluminium, avec un peu d’espace ou de jeu. Les pics observés pour 2Centre reflètent donc des modes vibratoires faiblement contraints et de faible raideur (mouvements quasi corps rigide de basculement/glisement et contacts intermittents en rive). Ces mécanismes favorisent un découplage partiel vis-à-vis du mouvement de la caisse interne et peuvent conduire à une amplification de la réponse du panneau par rapport à celle de la caisse interne.

Ce type d’observations est en accord avec l’amplification observée sur la structure de transfert (Figure 86 et Figure 87). Compte tenu de sa géométrie (environ 2,42 m de long et 0,913 m de haut), le panneau 2 se comporte comme une grande plaque élancée et flexible en polycarbonate, intégrée dans un cadre sans collage. Puisque le panneau est uniquement glissé dans le jeu du profilé aluminium, sans fixation mécanique, l’amplification dans le domaine des basses fréquences peut raisonnablement être attribuée à une condition aux limites faiblement contrainte plutôt qu’à la seule flexion « pure » de la plaque. Dans cette configuration, le panneau peut présenter des mouvements de quasi corps rigide (basculement, cliquetis, ou léger glissement dans son plan) à l’intérieur du cadre métallique, avec des contacts intermittents en périphérie. Cela équivaut à un appui de faible raideur et à un système de contact non linéaire (adhérence–glissement et chocs), ce qui abaisse les fréquences propres apparentes dans la bande d’excitation routière. Cela peut générer une transmissibilité élevée à basse fréquence, car le panneau n’est pas contraint à suivre le mouvement du cadre de manière contrôlée. Il en résulte que l’énergie liée au roulis/tangage et aux rebonds du camion peut se convertir en un

mouvement amplifié du panneau, en particulier latéralement, même sans contact direct entre le panneau et la tapisserie.

Une limitation majeure de ce résultat réside dans le fait que les propriétés mécaniques de la Tapisserie de Bayeux elle-même ne sont pas connues avec une précision suffisante (ex. : rigidité effective, amortissement, état de frisure des fibres, fragilisation liée au vieillissement, etc.). Étant donné que ces paramètres régissent la réponse dynamique de la tapisserie et sa sensibilité à la fatigue, il n'est pas scientifiquement robuste de définir un « seuil de dommage » vibratoire absolu (en accélération, déplacement ou DSP) qui serait valable pour l'objet réel. En l'absence d'un modèle mécanique validé et de données matériaux pour la Tapisserie, l'approche la plus défendable consiste donc à contrôler et comparer l'environnement vibratoire à l'aide d'indicateurs relatifs (transmissibilité, amplification à la résonance, etc.) et à minimiser les excitations rapides et répétitives dans les bandes critiques de basse fréquence.

Dans le cadre d'une étude plus approfondie, des mesures d'atténuation futures pourraient être développées selon une approche graduelle et fondée scientifiquement. En premier lieu, les mécanismes d'amplification à basse fréquence du paravent (panneau, cadre et interfaces/joints) seraient identifiés au moyen d'analyses de transmissibilité et d'analyses modales ; la transmission à travers l'interface matelas/Plastazote serait quantifiée à l'aide du fac-similé de la tapisserie. Sur la base de ces résultats, des solutions candidates (ex. augmentation de la rigidité panneau/cadre, ajout d'amortissement, amélioration des conditions aux limites et/ou ajout d'un étage d'isolation supplémentaire accordé sous la bande de fréquence critique) seraient prototypées puis comparées sous l'effet d'une excitation contrôlée, représentative des entrées routières (balayages sinusoïdaux, vibrations aléatoires mises en forme et événements transitoires).

Les propriétés mécaniques et les seuils d'endommagement de la Tapisserie originale n'étant pas suffisamment connus pour définir une limite vibratoire sûre, la stratégie s'appuierait sur des objectifs de conception conservateurs visant à réduire la transmissibilité à basse fréquence et la récurrence des pics d'événements, avec une validation par essais comparatifs (A/B testing) vis-à-vis de la configuration actuelle.

6.1.1.2. Effet des ralentissement

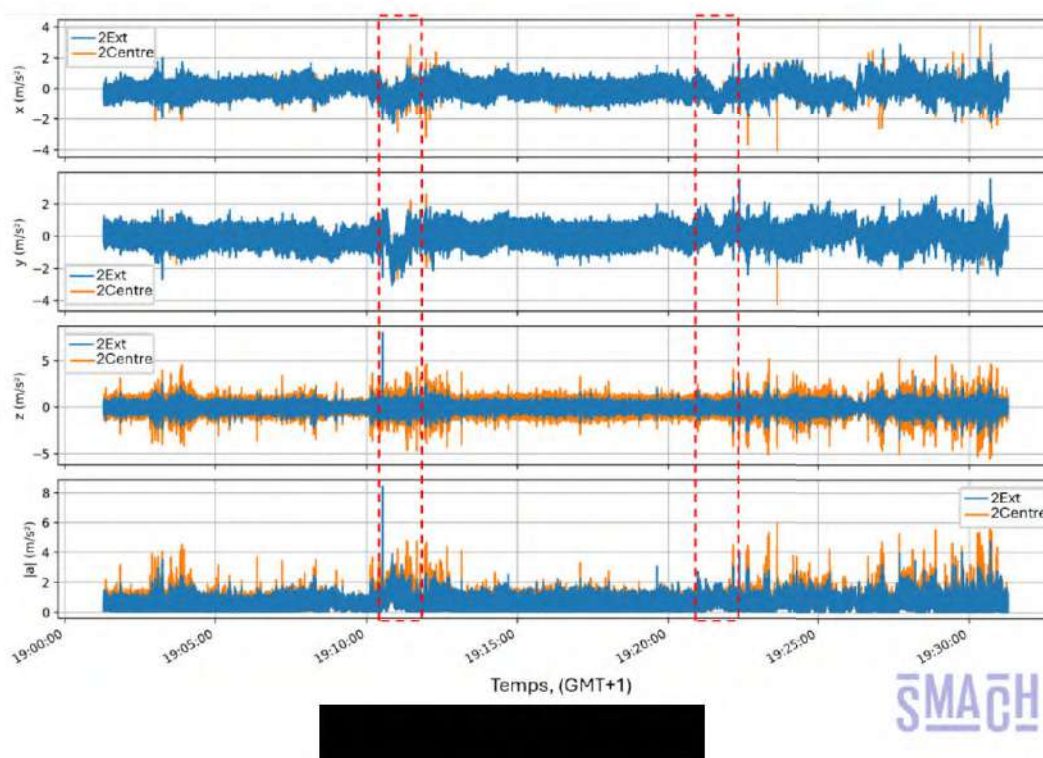


Figure 90 : Valeurs d'accélération au cours du temps sur 30 minutes sur [redacted] (avril 2026). Les valeurs du capteur 2Ext (caisse interne) sont tracées en bleu, celles du capteur 2Centre (panneau 2) en orange. Les deux [redacted] sont indiqués par une ligne en pointillée rouge.

La Figure 90 présente les données temporelles de l'accélération dans la caisse (2Centre, orange) super imposées sur celles de la caisse interne (2Ext, bleu) au niveau du panneau 2, lors du passage de [redacted]. Au niveau du panneau comme de la caisse interne, ces [redacted] provoquent des décélérations rapides de 90 à 0 km/h et une série de vibrations de grande amplitude. Il est possible de réduire ces vibrations en assurant un [redacted] afin de permettre un passage à minimum 30 km/h.

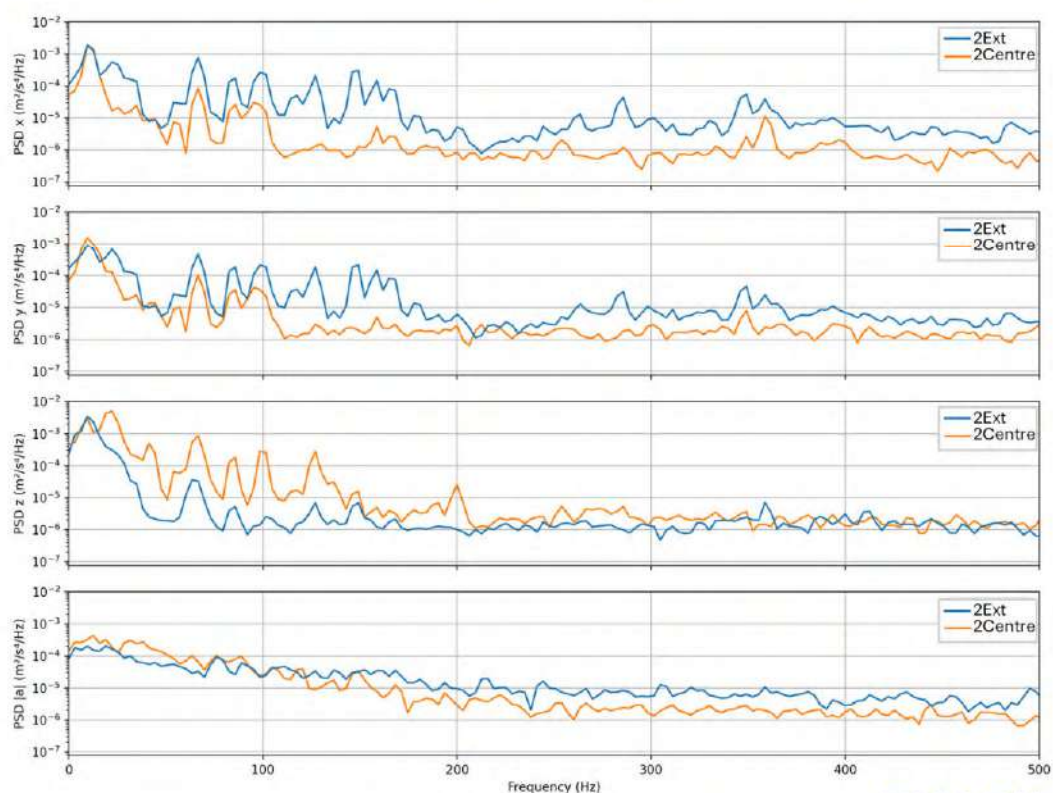


Figure 91 : Données tracées dans le domaine fréquentiel (niveaux de DSP vs fréquence) pour le trajet sur [redacted] en avril 2026. Les valeurs du capteur 2Ext (caisse interne) sont tracées en bleu, celles du capteur 2Centre (panneau 2) en orange.

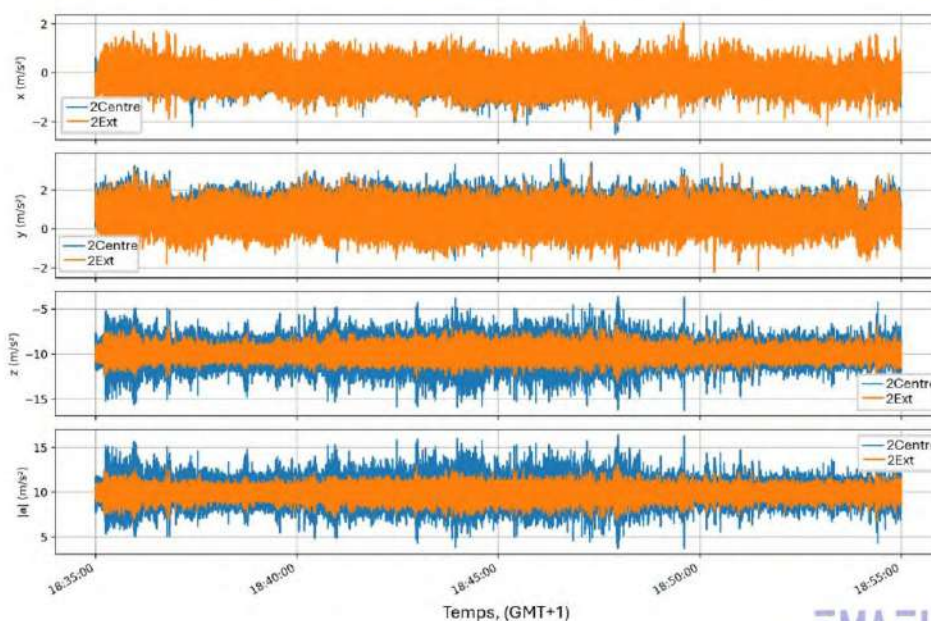
La Figure 91 présente les mêmes données dans le domaine fréquentiel sur une portion [redacted]. Etant donné que la route est identique à celle de la Figure 88 (février 2026), de nombreux pics d'énergie sont identiques. Toutefois, en comparant ces deux séries de courbes, nous observons que de nouveaux pics sont observés en Figure 91, dans la direction x, entre 50 et 150 Hz. Ces pics pourraient représenter l'impact énergétique fréquentiel de la décélération [redacted] s.

6.1.2. Transport routier [redacted] britannique

6.1.2.1. Zone de tarmac dégradé



Figure 92 : Vue d'une section représentative [redacted] février 2026. ©SMACH



SMACH

Figure 93 : Valeurs d'accélération au cours du temps sur 30 minutes sur une [redacted] (aller, février 2026). Les valeurs du capteur 2Ext (caisse interne) sont tracées en orange, celles du capteur 2Centre (panneau 2) en bleu.

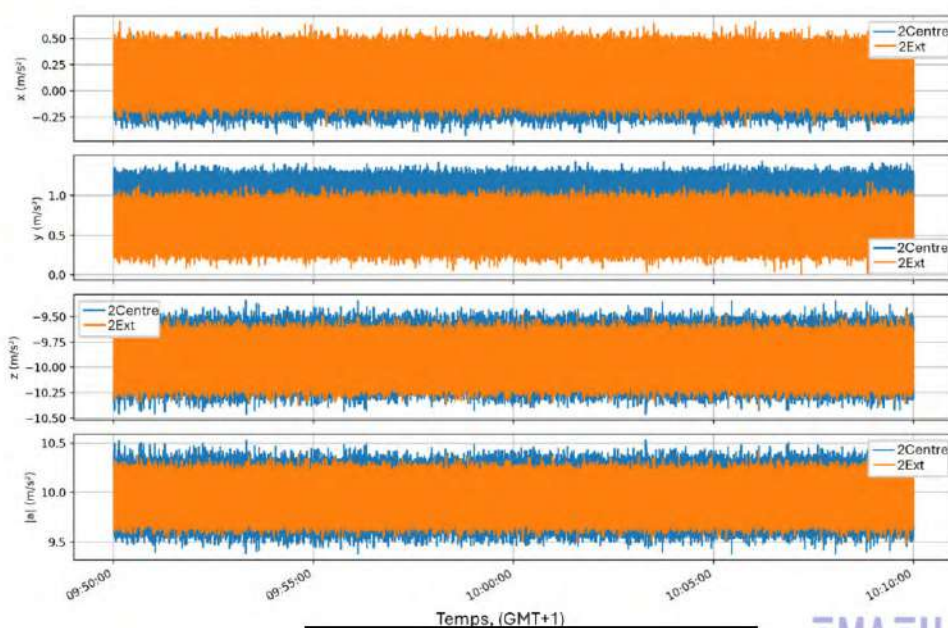


Figure 94 : Valeurs d'accélération au cours du temps sur 30 minutes sur une [redacted] (retour, février 2026). Les valeurs du capteur 2Ext (caisse interne) sont tracées en orange, celles du capteur 2Centre (panneau 2) en bleu.



Figure 95 : Données tracées dans le domaine fréquentiel (niveaux de DSP vs fréquence) pour [redacted] (aller, février 2026). Les valeurs du capteur 2Ext (caisse interne) sont tracées en orange, celles du capteur 2Centre (panneau 2) en bleu.

Les conditions de conduite sur la section britannique différaient considérablement de celles de la section française. À l'aller, les données temporelles montrent un régime continu de vibrations d'amplitude plus élevée, soutenu sur de longues durées (ex. : vibrations constantes de haut niveau sur des intervalles de 30 minutes – Figure 94). Au retour, ce régime de forte amplitude se poursuit, avec des pics individuels liés à des défauts distincts sur la route (Figure 93). Les pics d'énergie présentés en Figure 95 démontrent que l'énergie transmise à la caisse interne et au panneau 2 se concentre en dessous de 160 Hz. L'emplacement de ces pics ne correspond pas tout à fait à ceux observés sur les routes françaises, cela est sans doute dû aux différences de revêtement et de qualité des routes anglaises. Toute comme sur les routes françaises, le panneau 2 continue d'amplifier les vibrations reçues par la caisse interne.

Les différences observées s'expliquent par la qualité de la surface des routes. Le revêtement routier présente de nombreux défauts réguliers (joints, nids-de-poule), générant une excitation périodique.

6.1.2.2. Zone de tarmac non dégradé

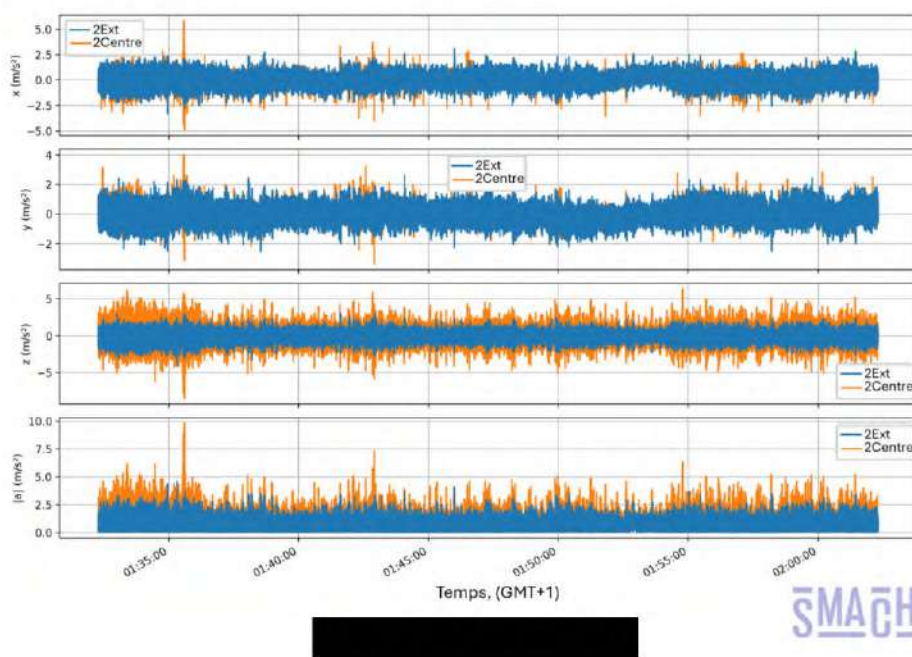


Figure 96 : Valeurs d'accélération au cours du temps sur 30 minutes sur une [redacted] (avril 2026). Les valeurs du capteur 2Ext (caisse interne) sont tracées en bleu, celles du capteur 2Centre (panneau 2) en orange.

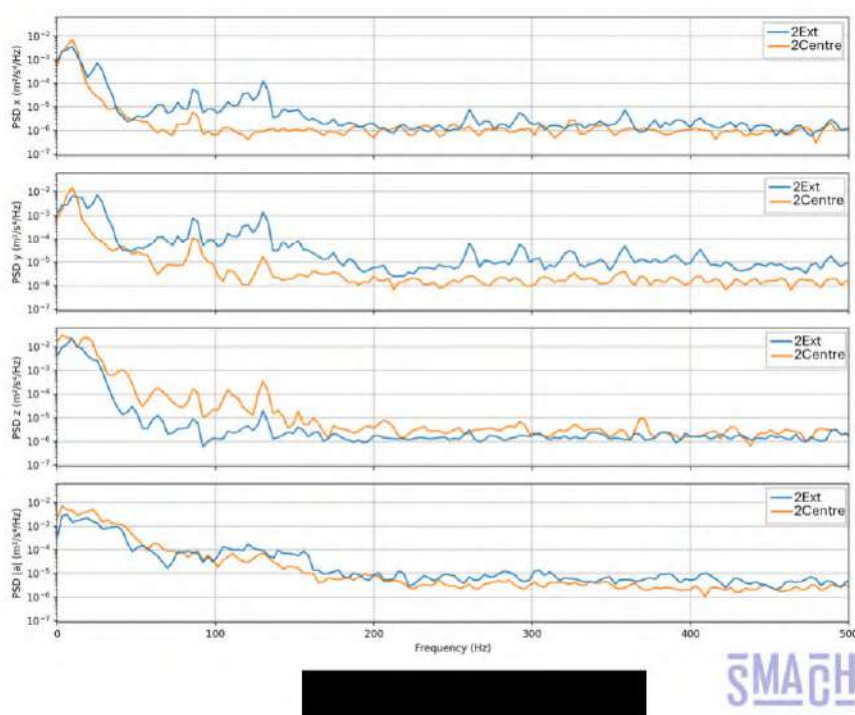


Figure 97 : Données tracées dans le domaine fréquentiel (niveaux de DSP vs fréquence) pour [REDACTED] (avril 2026). Les valeurs du capteur 2Ext (caisse interne) sont tracées en bleu, celles du capteur 2Centre (panneau 2) en orange.

Dans le domaine temporel, Figure 96, le régime vibratoire est continu, sans phases calmes intercalaires : amplitudes RMS de l'ordre de 1–2 m/s² sur les trois axes, norme $\|a\|$ oscillant continûment entre 1 et 3 m/s². Cette signature « bruit soutenu » est caractéristique d'une excitation périodique générée par les défauts réguliers du revêtement britannique (comme sur la Figure 93), à la différence du régime français dominé par des défauts discrets. Deux événements transitoires émergent du fond continu — pic à $\|a\| \approx 10$ m/s² vers 01:35:30 et pic à $\|a\| \approx 7,5$ m/s² vers 01:42:30 — attribuables à des défauts ponctuels marqués (raccord d'ouvrage d'art et nid-de-poule profond).

Le comportement vertical (z) est cohérent avec les observations françaises. Le panneau 2 amplifie systématiquement les vibrations verticales transmises par la caisse interne entre 50 et 150 Hz, avec des pics nets autour de 60, 90 et 130 Hz. Cette amplification confirme le mécanisme identifié sur [REDACTED] : conditions aux limites faiblement contraintes du panneau de polycarbonate dans son profilé aluminium, modes quasi corps rigide à basse fréquence, transmissibilité élevée verticale.

Analyse épistémique : l'inversion de transmissibilité observée pour le capteur 2Centre (Figure 97) sur les axes x et y entre [REDACTED] françaises et britannique appelle une explication physique dépassant le simple constat. La cartographie complète des cinq capteurs du panneau apporte les éléments nécessaires : les capteurs périphériques (2Left, 2Right, 2Front, 2Rear), au voisinage des

profilés aluminium, présentent une atténuation stable des composantes dans le plan, indépendante du type de revêtement ; seul le centre — où les déplacements de quasi corps rigide du panneau dans son cadre atteignent leur amplitude maximale — est le siège d'un comportement dépendant du régime d'excitation.

Le mécanisme proposé pour rendre compte de cette dépendance est le suivant.

l'excitation reste d'amplitude modérée. Le panneau, glissé avec jeu dans le profilé aluminium, est susceptible d'osciller à l'intérieur de cet espace résiduel selon un régime de contact intermittent adhérence–glissement (*stick-slip*) : adhérence temporaire au profilé, accumulation d'énergie élastique, glissement brusque, puis réadhérence. Ce régime non linéaire produirait, en partie centrale, une transmissibilité dans le plan supérieure à l'unité dans la bande basse fréquence (10–150 Hz). Les pics observés sur la DSP du capteur 2Centre entre 80 et 150 Hz, en x et y, où 2Centre dépasse 2Ext d'un facteur 2 à 5 sur françaises, seraient la signature spectrale de ce mécanisme.

l'excitation devient plus énergétique et plus continue, du fait des défauts périodiques et soutenus du revêtement. Le régime de contact basculerait alors vers un glissement quasi continu à l'intérieur du jeu : les phases d'adhérence se raccourcissent, le panneau ne peut plus accumuler l'énergie élastique caractéristique du *stick-slip*, et la transmissibilité non linéaire s'effondre. La caisse interne, elle, plus rigide et linéairement couplée à l'excitation routière, continue de voir son niveau croître proportionnellement à l'intensité de l'excitation. Le capteur 2Centre présente alors des niveaux de DSP inférieurs à ceux du capteur 2Ext reprojeté, alors qu'ils leur étaient supérieurs.

Cette interprétation est compatible avec trois observations indépendantes de la cartographie : (i) l'inversion x,y est confinée au centre du panneau, où l'amplitude des déplacements quasi corps rigide est maximale ; (ii) elle n'apparaît que sur britannique, lorsque le régime d'excitation est suffisamment énergétique pour saturer les contacts intermittents ; (iii) elle ne concerne pas l'axe z, sur lequel le mécanisme dominant n'est pas un contact tangentiel intermittent mais le premier mode de flexion hors-plan du panneau, dont la réponse linéaire reste indépendante du niveau d'excitation.

Ce raisonnement constitue, à ce stade, une interprétation physique cohérente avec l'ensemble des données acquises, et non une démonstration formelle. La validation rigoureuse du mécanisme exigerait soit une analyse modale opérationnelle exploitant les cinq capteurs comme un réseau d'accéléromètres distribués, soit une campagne d'essais contrôlés sur banc instrumenté, avec excitation calibrée à différents niveaux d'amplitude permettant de balayer le passage du régime *stick-slip* au régime de glissement continu.

6.1.3. [REDACTED]

Pendant la phase de transit [REDACTED] la cabine du camion et la caisse ont subi un balancement latéral à basse fréquence (roulis). Ce mouvement a été transmis à la caisse interne et perçu par les capteurs, confirmant que le mouvement latéral basse fréquence n'est pas totalement amorti par la suspension du camion ou de la caisse.

6.1.3.1. Impact opérationnel : [REDACTED]

[REDACTED]

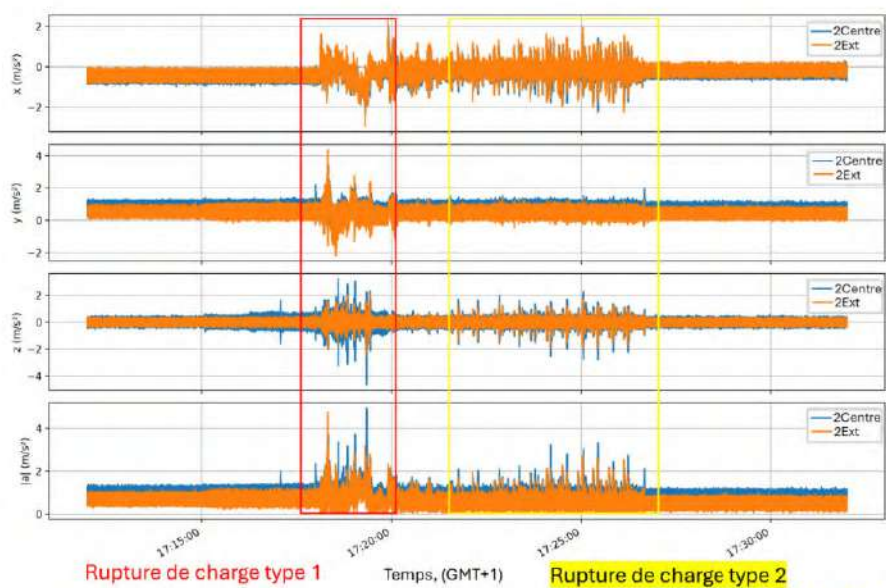


Figure 100 : Valeurs d'accélération au cours du temps pendant 30 minutes [redacted] aller, février 2026). Capteur 2Ext (caisse interne) en orange, capteur 2Centre (panneau 2) en bleu. Rupture de charge type 1 en rouge, type 2 en jaune.

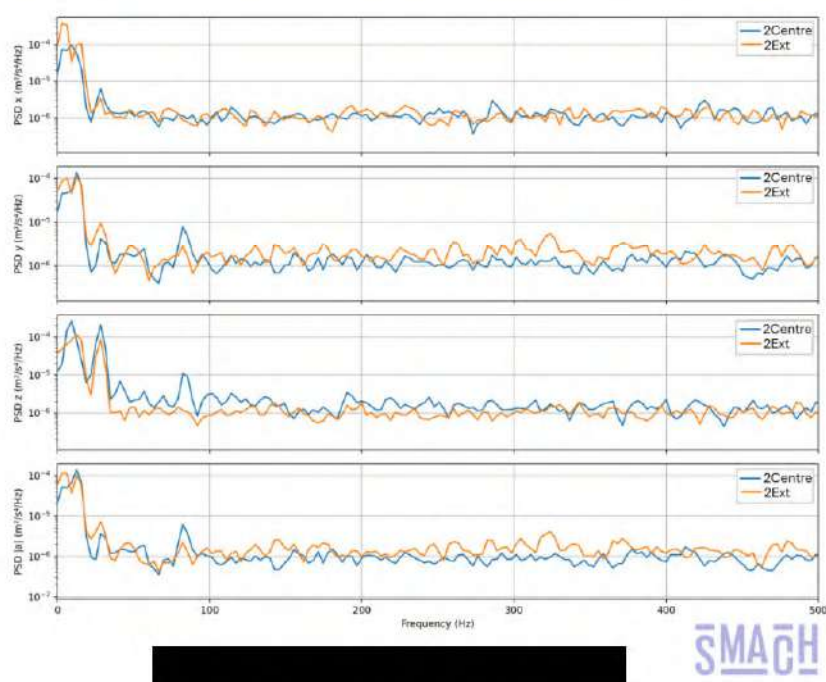


Figure 101: Données tracées dans le domaine fréquentiel (niveaux de DSP vs fréquence) pour [redacted] (aller, février 2026). Capteur 2Ext (caisse interne) en orange, capteur 2Centre (panneau 2) en bleu.

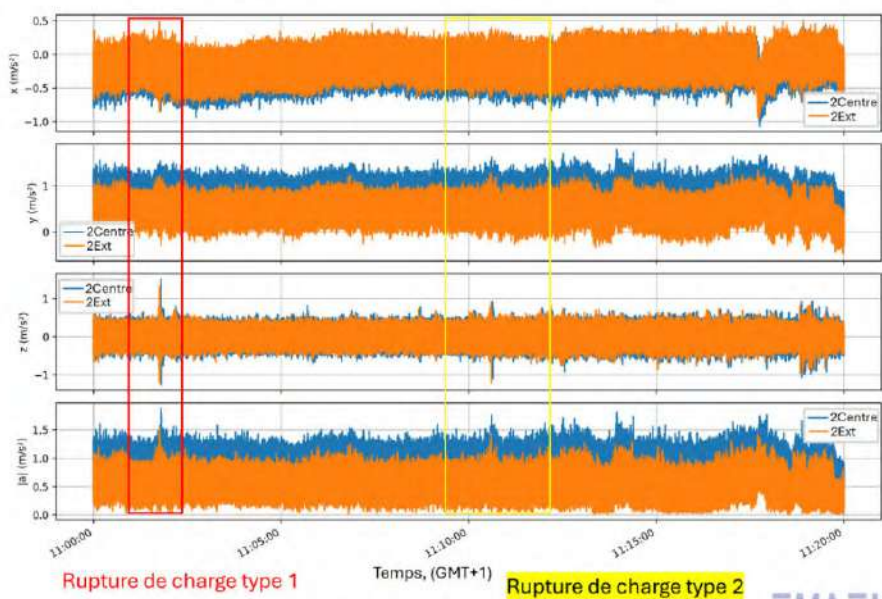


Figure 102 : Valeurs d'accélération au cours du temps pendant 30 minutes [redacted] (retour, février 2026). Capteur 2Ext (caisse interne) en orange, capteur 2Centre (panneau 2) en bleu. Rupture de charge type 1 en rouge, type 2 en jaune.

À l'aller, le camion [REDACTED] (et 12 ruptures de charge).

[REDACTED] A chacune de ces ruptures de charge, un choc transitoire de forte amplitude (impact) a été ressenti par la caisse interne et le panneau, sur l'axe vertical z (Figure 100).

Au retour, le camion [REDACTED] et a franchi une rupture de charge de type 1 et une de type 2 (Figure 102). Une observation critique concernant les chocs transitoires a été identifiée lors du chargement et du déchargement du camion [REDACTED]

6.1.3.2. [REDACTED]

Les valeurs d'accélération pendant le trajet [REDACTED] sont similaires à celles enregistrées lors du transport routier [REDACTED] (Figure 103).

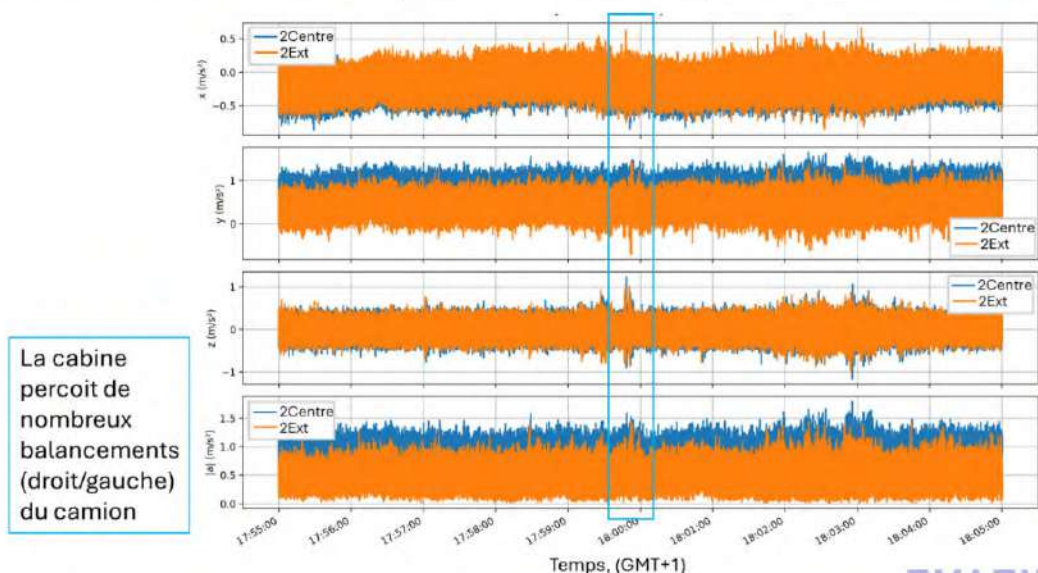


Figure 103 : Valeurs d'accélération au cours du temps pendant 30 minutes pendant le trajet à vitesse de croisière [REDACTED] (aller, février 2026). Capteur 2Ext (caisse interne) en orange, capteur 2Centre (panneau 2) en bleu. Le mouvement de balancement subi en cabine se transmet et se traduit par des pics supplémentaires dans la réponse vibratoire de la caisse interne et du panneau.

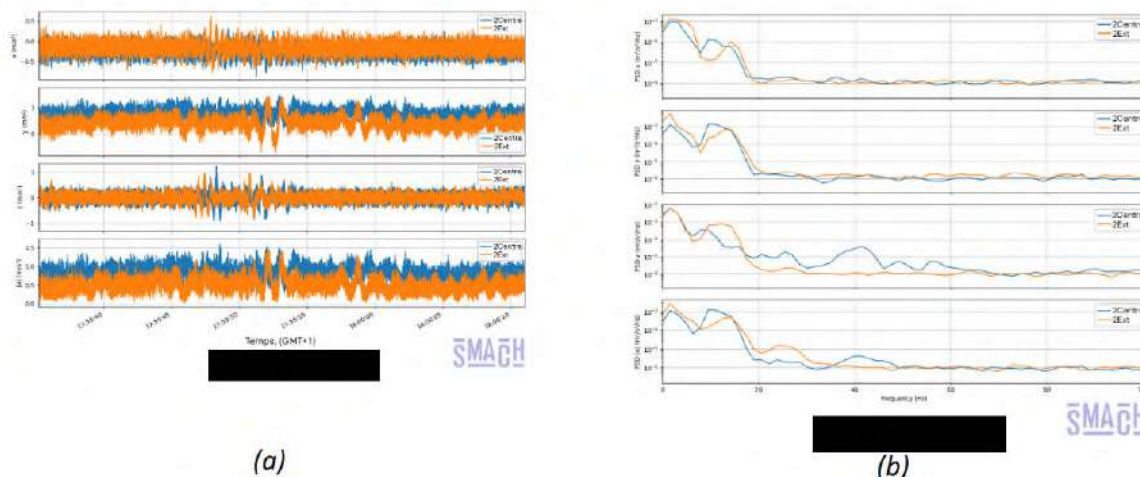


Figure 104 : Le mouvement de balancement subi en cabine se transmet et se manifeste par des pics supplémentaires dans la réponse vibratoire de la caisse interne et du panneau. (a) Détail du signal mesure sur 2 min, avec les accélérations mesurées lors du roulage à [redacted] (trajet aller, février 2026). (b) Détail jusqu'à 100 Hz des données dans le domaine fréquentiel (niveaux de DSP en fonction de la fréquence) pendant le roulage à [redacted] (trajet aller, février 2026). Les valeurs du capteur 2Ext (caisse interne) sont tracées en orange, et celles du capteur 2Centre (panneau 2) en bleu.

[redacted] la caisse présente un comportement dominé par un mouvement de ballant autour de 18h (Figure 104), visible sous la forme d'oscillations de grande amplitude et de basse fréquence principalement sur l'axe latéral (y). Par rapport au régime quasi stationnaire environnant, un épisode distinct apparaît au milieu de la séquence : l'accélération selon y évolue vers des oscillations quasi périodiques (plusieurs cycles successifs), compatibles avec l'excitation d'un mode de balancement. La réponse est observée simultanément sur les deux capteurs (2Centre et 2Ext, après reprojexion), ce qui indique un mouvement global de la caisse plutôt qu'une vibration strictement locale, avec une augmentation corrélative de la norme de l'accélération. L'axe longitudinal (x) demeure relativement moins affecté, ce qui étaye l'interprétation selon laquelle la perturbation dominante [redacted] est un ballant latéral, plutôt qu'une excitation avant–arrière.

6.1.3.3.

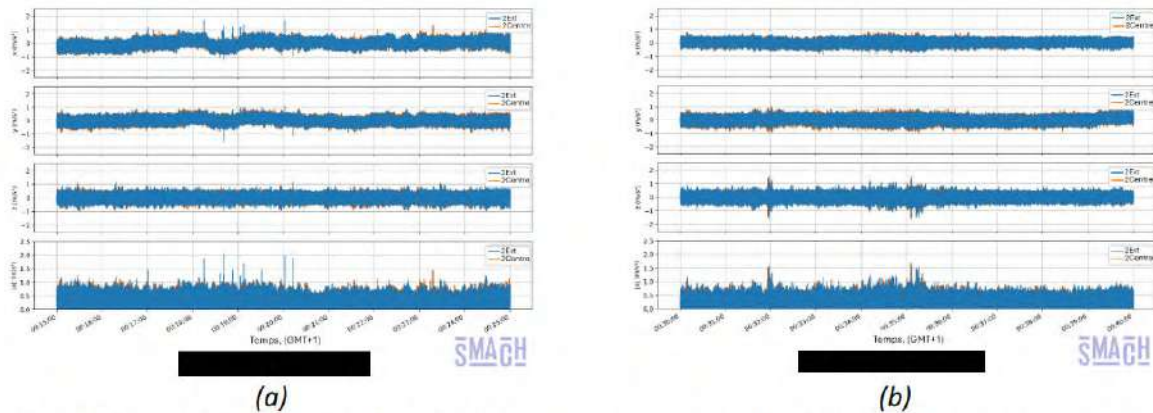


Figure 105 : Valeurs d'accélération au cours du temps pendant 10 minutes pendant le trajet dans le [redacted] (avril 2026). Capteur 2Ext (caisse interne) en bleu, capteur 2Centre (panneau 2) en orange. (a) [redacted] (b) [redacted]

Les résultats du test de [redacted] sont présentés en Figure 105. En comparant les amplitudes d'accélération mesurées, il est observé que les niveaux vibratoires arrivant sur la caisse interne sont très proches des niveaux perçus par le panneau 2. Il ne semble pas y avoir de problème d'amplification au niveau du paravent. Les amplitudes sont aussi assez similaires [redacted] avec quelques séries de pics de vibration un plus importants dans les deux cas. [redacted] nous pouvons observer des épisodes de décélération puis d'accélération en x et y entre 00:18 et 00:19. Ces mesures n'ont pas pu être corrélées avec un ressenti par le convoyeur en cabine, qui n'a pas noté de changement de comportement du camion en général. Nous ne disposons pas de données techniques sur le comportement [redacted] donc il est difficile d'expliquer la raison de ces variations d'accélération. Toutefois, il peut être conclu que ces épisodes de changement d'accélération, qui s'étaient aussi produit pour les [redacted], doivent être évités pour ne pas générer davantage de vibrations. Il est donc recommandé [redacted]

6.2.Comportement thermo-hygro-mécanique

6.2.1. Résultat lors du voyage test no1 en février 2026

Les capteurs StaRT ont également assuré le suivi de la température et de l'humidité relative. Concernant leur positionnement, la majorité a été installée à l'intérieur de la structure de

transfert (ex. 2Centre / Panneau 2) et l'un d'eux a été placé à l'extérieur de la caisse interne, sur la caisse externe, entouré d'un film étirable (Figure 68).

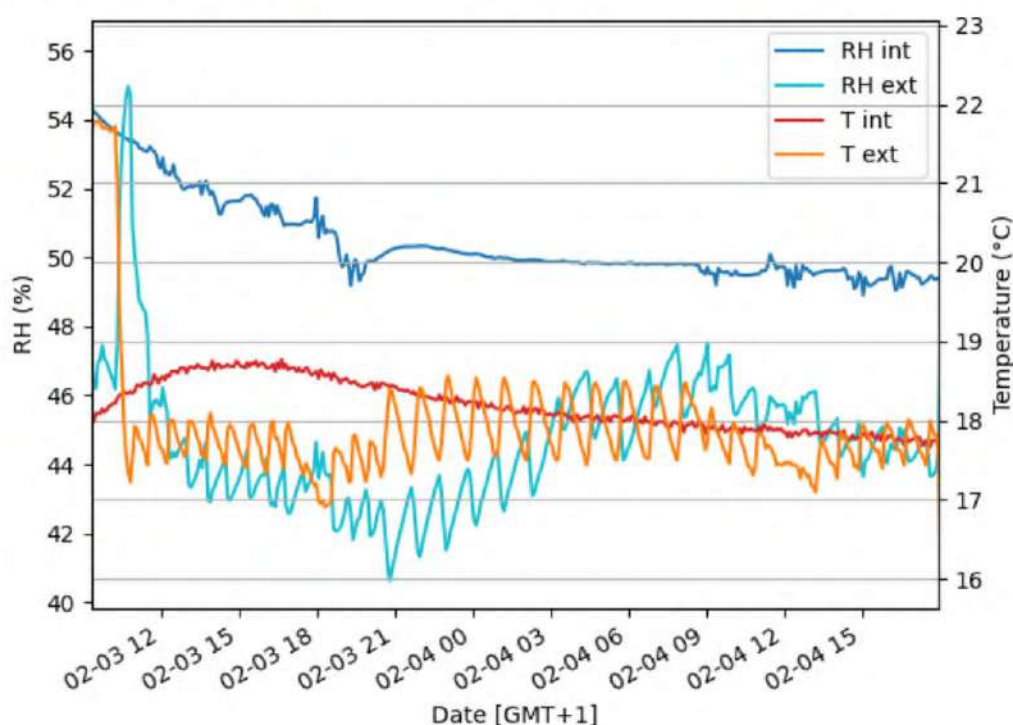


Figure 106 : Évolution de l'humidité relative (RH) et de la température (T) sur les deux jours de transport test 1 en février 2026. La courbe bleu foncé représente l'RH à l'extérieur de la caisse interne. La courbe bleu clair représente l'RH à l'intérieur du système de transfert. La courbe rouge représente la T à l'intérieur du système de transfert. La courbe orange représente la T à l'extérieur de la caisse interne.

Sur la Figure 106, on observe une température à l'intérieur du système de transfert (courbe rouge) très stable à $18,2\text{ °C} \pm 0,3\text{ °C}$ sur les deux jours de transport test no1 en février 2026. L'humidité relative (RH) à l'intérieur du système de transfert (courbe bleu foncé) est également stable, à $50,3\% \pm 1,0\%$. Le camion étant régulé en température et en humidité relative, le climat mesuré à l'extérieur de la caisse interne est lui aussi considéré comme stable, avec $44,5\% \pm 1,7\%$ et $17,8\text{ °C} \pm 0,3\text{ °C}$. Ces fluctuations restent compatibles avec les limites de fluctuations à court terme de la classe ASHRAE "A1" (édition SI 2019 du *ASHRAE Handbook—HVAC Applications*), soit $\pm 5\%$ HR et $\pm 2\text{ °C}$.

Le camion présente une régulation climatique plus performante que les exigences de la classe A1 des recommandations muséales de l'ASHRAE.

Comparativement à la Tapisserie de Bayeux lors de son suivi hygromécanique en 2021 (publié dans Gauvin et al., « A 1000-year-old story told over 70 metres: A multidisciplinary approach for the future conservation and display of the Bayeux Tapestry », *Working Towards a Sustainable Past. ICOM-CC 20th Triennial Conference Preprints*, Valencia, 18–22 septembre 2023, J. Bridgland

(éd.), Paris: International Council of Museums, 2023), le climat observé pendant le transport apparaît nettement moins contraignant d'un point de vue hygromécanique. Dans l'étude en situation d'exposition, la Tapisserie a montré des réponses en déformation mesurables lorsque l'humidité relative variait rapidement, avec des augmentations allant jusqu'à +0,02 % de déformation verticale lors d'une variation 50–59 % RH sur 12 h, et une déformation horizontale maximale de –0,03 % lors d'une baisse rapide de l'RH. Ces résultats indiquent une sensibilité marquée au taux de variation climatique : des variations lentes génèrent de faibles niveaux de déformation, tandis que des fluctuations rapides et répétées ont été identifiées comme un risque potentiel à long terme via des mécanismes de fatigue.

Pendant le transport, le climat à l'intérieur du système de transfert est resté très stable ($18,2\text{ °C} \pm 0,3\text{ °C}$; $50,3\text{ \%} \pm 1,0\text{ \% RH}$ sur deux jours), avec des conditions également stables à l'extérieur de la caisse interne ($17,8\text{ °C} \pm 0,3\text{ °C}$; $44,5\text{ \%} \pm 1,7\text{ \% RH}$). Ces fluctuations sont largement inférieures aux limites de fluctuations à court terme de la classe muséale ASHRAE A1 ($\pm 5\text{ \% RH}$ et $\pm 2\text{ °C}$). Ainsi, contrairement au scénario d'exposition où des variations rapides d'RH peuvent induire des réponses en déformation plus élevées, la configuration de transport a assuré un microclimat contrôlé, susceptible de minimiser le risque mécaniquement induit associé aux transitoires hygrométriques. La priorité de conservation préventive qui ressort de cette comparaison est donc d'éviter les variations rapides d'RH pendant l'exposition (ou toute phase où la Tapisserie est exposée), tout en maintenant un niveau de régulation climatique au moins aussi strict que celui démontré durant le transport.

Analyse de la pression

Dû au mauvais temps du mois de février 2026 lors du transport test, le niveau de pression de ce test est inexploitable (dépression atmosphérique).

6.2.2. Résultat lors du voyage à blanc en avril 2026

Grâce aux capteurs placés, dans et sur la caisse, nous avons constaté qu'aux débuts des opérations d'emballage dans le [REDACTED] l'humidité et la température ne sont pas optimum.

La porte de la réserve est restée fermée, et les machines placées sous la tente n'ont pas suffi à couvrir le climat de la structure et de du sas.

Pour le trajet final, nous recommandons le placement de machines supplémentaires dans cet espace. De par l'exigüité des espaces, nous devrons les enlever avant de commencer les manipulations.



Les courbes Figure 108 des capteurs intérieurs et extérieurs pour l'hygrométrie et la température. Il est important de noter que le capteurs N°2Ext (courbe orange) était placé sous la tente jusque 14h47. Les variations s'expliquent par les ouvertures et fermetures de la tente pour laisser passer du personnel extérieur aux manipulations.

La mise en caisse s'est finie à 14:30 avec



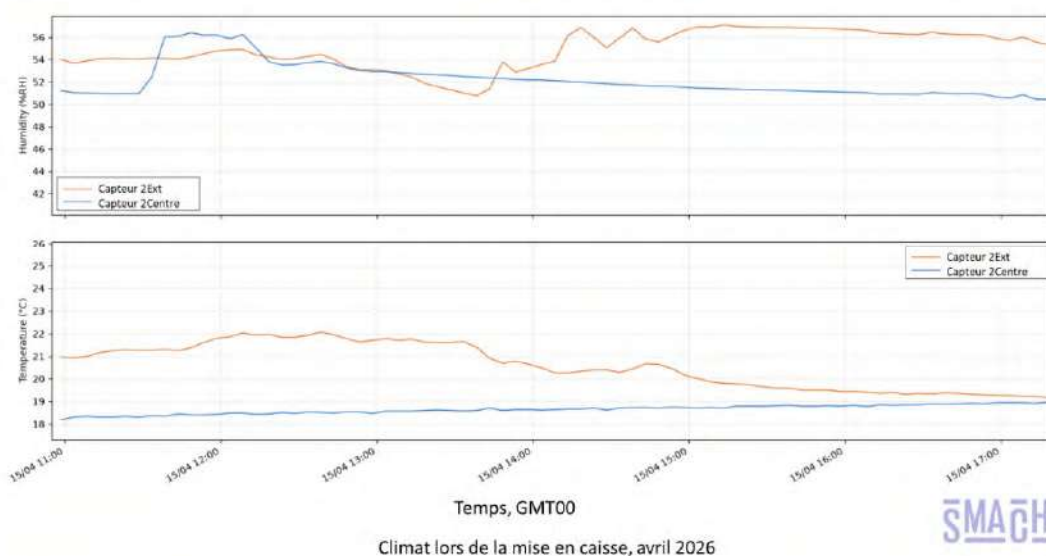


Figure 108 : Évolution de l'humidité relative (RH) et de la température (T) lors de la mise en caisse en avril 2026. Le capteur 2Ext de la caisse interne est en orange et le capteur 2Centre de l'intérieur du paravent est en bleu.

Durant le transport les courbes sont restées très stables à l'intérieur de la caisse (Figure 109). Le changement sur la courbe orange correspond à l'ouverture des portes du camion pour le déchargement en extérieur au British Museum.

Le capteur à l'extérieur de la caisse était placé sous le film plastique pour protéger la caisse de la pluie. Pour le transport final de la Tapisserie, il faudra envisager de ne filmer la caisse qu'en cas de pluie afin de permettre une meilleure circulation de l'air.

Le capteur de consigne à l'intérieur du camion est placé à la sortie du flux d'air et non au milieu du camion afin de faciliter les chargements des caisses. Il est envisagé de baisser la consigne demandée afin d'avoir une hygrométrie plus correcte au centre de la remorque. Notons que le climat dans le camion reste dans la fourchette de variations admises.

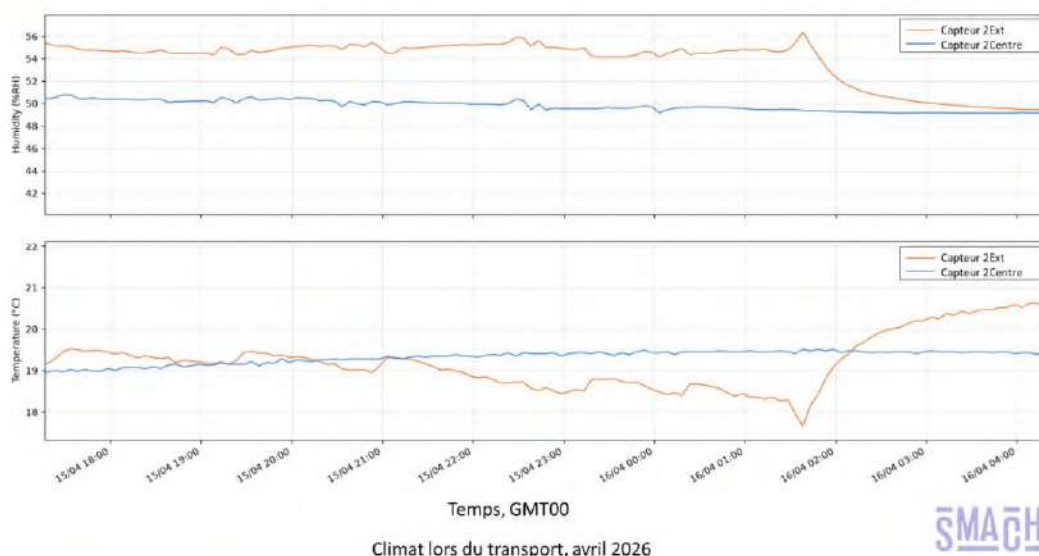


Figure 109 : Évolution de l'humidité relative (RH) et de la température (T) lors du transport d' avril 2026. Le capteur 2Ext de la caisse interne est en orange et le capteur 2Centre de l'intérieur du paravent est en bleu.

[REDACTED] Cette salle n'est pas climatisée et des variations sont enregistrées à l'extérieur de la caisse mais très peu à l'intérieur : 1% d'humidité et 1° C entre 4h00 à 13h30 le 16 avril 2026.

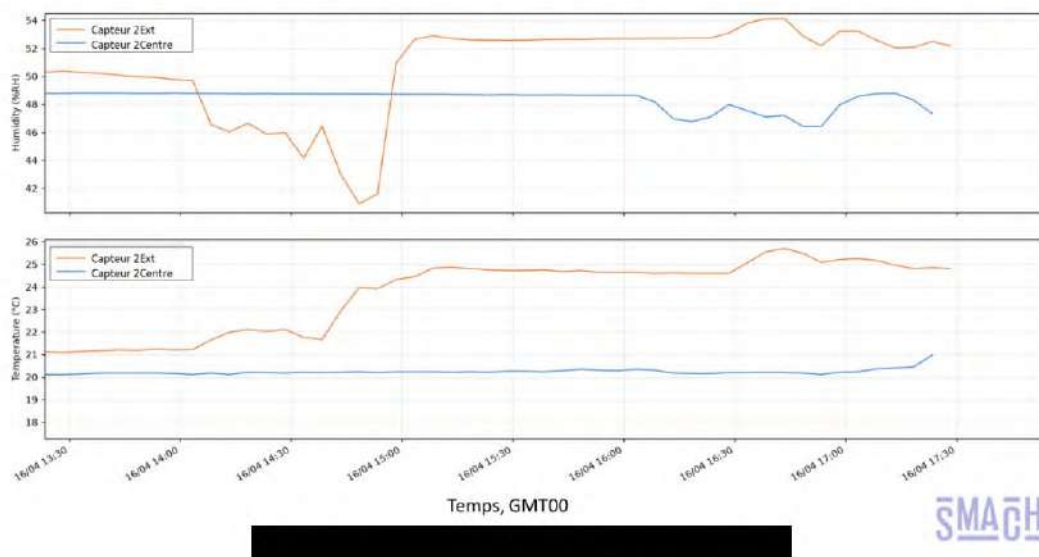


Figure 110 : Évolution de l'humidité relative (RH) et de la température (T) lors du stockage de la caisse [REDACTED] Le capteur 2Ext de la caisse interne est en orange et le capteur 2Centre de l'intérieur du paravent est en bleu.

Entre 16:26 et 16:51, une ouverture de 2mm sur chaque paroi de la caisse a été opérée avec les variations de climat que l'on observe.

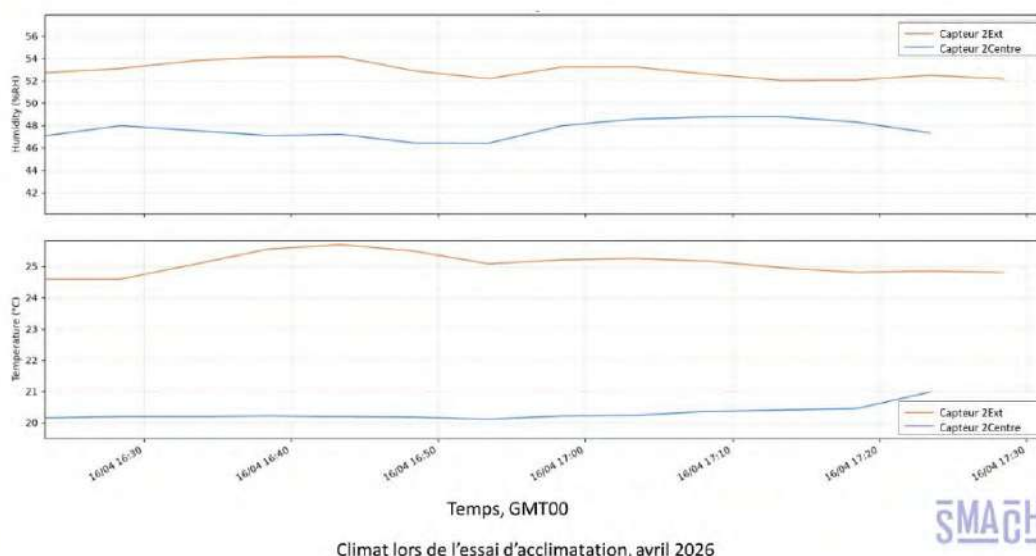


Figure 111 : Évolution de l'humidité relative (RH) et de la température (T) lors d'un essai d'acclimatation de la caisse au British Museum, en avril 2026. Le capteur 2Ext de la caisse interne est en orange et le capteur 2Centre de l'intérieur du paravent est en bleu.

A l'issue de ce test, nous recommandons l'ouverture de la caisse uniquement dans un environnement climatisé pour permettre une acclimatation lente et stable avec l'ouverture des parois de la caisse.

Analyse de la pression

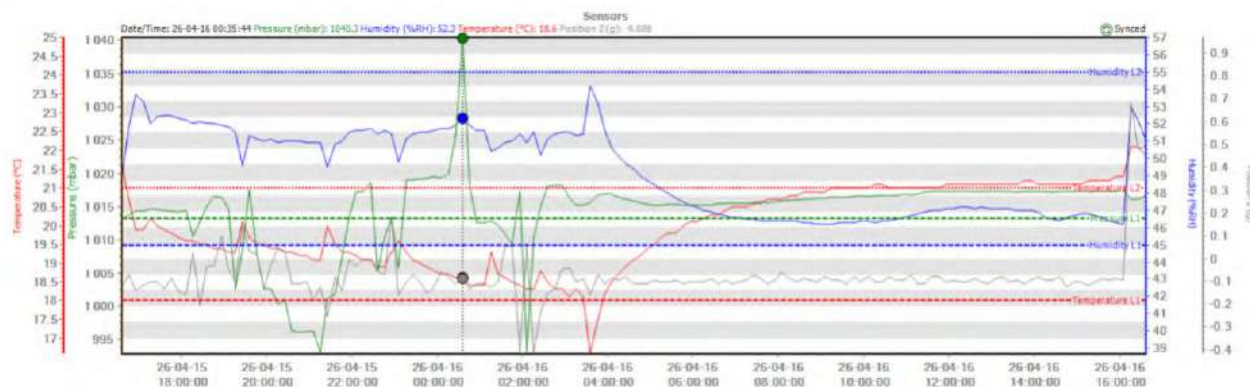


Figure 112 : Courbes Température (rouge), Pression (verte), Humidité relative (bleue) et Accélération vertical (grise) au cours du temps (GMT+1) lors du voyage a blanc d'avril 2026. Le capteur est placé à l'extérieur de la caisse externe.

Valeurs au curseur (16/04, 00:35:44) : Pression : 1040,3 mbar. Humidité relative : 52,3 %HR. Température : 18,6 °C. Accélération Z : -0,088 g.

Suivant l'horodatage SMACH, ces valeurs correspondent [REDACTED]

Voie température (rouge) — Décroissance lente et monotone sur la première phase, depuis 21,5 °C en début d'acquisition jusqu'à un minimum d'environ 18 °C atteint vers 04:00-05:00 le 16/04. Remontée progressive ensuite, retour vers ~21 °C en fin d'enregistrement vers 16:00. Variation totale 3,5 °C sur 24 h, gradient maximum estimé à 0,3-0,5 °C/h.

Voie humidité relative (bleu) — Stabilité globale autour de 50-53 %HR sur les huit premières heures d'enregistrement (15/04 17:00 à 16/04 01:00), avec oscillations de l'ordre de ± 2 points autour de la moyenne. Excursion brève à 52 %HR au [REDACTED]. Décroissance marquée entre 02:00 et 08:00 le 16/04, depuis 52 %HR jusqu'à un minimum d'environ 43 %HR, soit -9 points en 6 heures [REDACTED]. Remontée lente ensuite, stabilisation autour de 47 %HR en seconde moitié de journée, puis pic terminal vers 53 %HR à 16:00.

Voie pression (vert) — Comportement bimodal nettement distinct sur les deux phases. Phase 1 (15/04 17:00 → 16/04 01:00) : forte variabilité, pics négatifs récurrents descendant à 993-1000 mbar, retours rapides vers une ligne de base 1015-1020 mbar, signature en « créneaux » caractéristique. Pic positif isolé à 1040,3 mbar à 00:35 le 16/04 ([REDACTED]). Phase 2 (16/04 01:00 → 05:00) : excursion négative prolongée et lissée, minimum vers 994 mbar atteint entre 03:00 et 04:00, durée de l'excursion 2-3 heures. Phase 3 (16/04 05:00 → 16:00) : stabilisation autour de 1015-1018 mbar, légère croissance monotone, comportement compatible avec un véhicule à l'arrêt sous régime barométrique stable.

Voie accélération Z (gris) — Forte activité oscillatoire en phase 1 (15/04 17:00 → 16/04 01:00), excursions $\pm 0,3$ à $\pm 0,4$ g autour d'une moyenne nulle, signature typique de transport routier sur [REDACTED] avec passage d'ouvrages d'art. Apaisement progressif à partir de 22:30 [REDACTED]. Baseline plate à -0,088 g pendant [REDACTED] (00:35). Activité résiduelle modérée en phase 2 (route britannique), nettement inférieure en amplitude à la phase routière française. Baseline plate stable à -0,1 g entre 05:00 et 15:30 le 16/04, signature caractéristique d'un véhicule à l'arrêt. Pic terminal d'amplitude +0,6 g vers 16:00, suivi d'oscillations, compatible avec une opération de manutention (déchargement).

Synchronisation pression-accélération en phase 1. Les excursions négatives de la voie pression sur la phase routière française sont temporellement synchrones de pics d'accélération verticale. Cette corrélation est diagnostique d'une sensibilité parasite du capteur de pression aux sollicitations mécaniques (couplage accélérométrique sur membrane piézorésistive), couramment observée sur les capteurs MEMS intégrés en datalogger de transport.

Découplage pression-accélération [REDACTED] Le pic de pression à 1040,3 mbar (00:35) s'observe en l'absence de corrélat vibratoire (voie Z plate à -0,088 g). Ce découplage valide l'interprétation du pic comme signal barométrique réel, attribuable à [REDACTED] selon l'atmosphère type ISO 2533) et de la composante de surpression [REDACTED]

Découplage pression-accélération en phase 2. L'excursion négative prolongée de la pression entre 02:00 et 05:00 le 16/04 ne s'accompagne pas de pics accélérométriques significatifs. Cette signature, combinée à la décroissance simultanée de l'humidité relative, est compatible avec un changement de masse d'air (probable passage frontal sur le sud-est du Royaume-Uni en seconde moitié de nuit).

6.3. Résumé

- a) Environnement : Le réseau routier britannique génère des amplitudes vibratoires nettement plus élevées et plus constantes que le réseau français, du fait de défauts de surface plus réguliers.
- b) Couplage : La structure de transfert est rigidement connectée à la caisse interne, ce qui entraîne une transmission directe des vibrations de basse fréquence (< 100 Hz).
- c) Atténuation :
 - i. La stratégie consistant [REDACTED] constitue une mesure opérationnelle validée permettant de réduire l'exposition aux chocs d'un facteur six.
 - ii. Atténuation des accélérations en évitant les arrêts [REDACTED] toute en respectant les 30 km/h de passage.
 - iii. Atténuation des balancements : [REDACTED] km/h.
- d) Hygromécanique : Le camion présente une régulation climatique plus performante que les exigences de la classe A1 des recommandations muséales de l'ASHRAE.

7. Matériaux de conservation utilisés

Les matériaux choisis pour habiller le paravent 2 sont les mêmes que ceux employés pour l'habillage du paravent 1, sur lequel est suspendue la broderie de Bayeux. Ils garantissent une innocuité chimique et une stabilité, ainsi qu'un bon maintien à l'intérieur de la structure (paravent) tout en évitant frottement, tension, écrasement et pli sur le fac-simile comme sur la Tapisserie. Ces matériaux ont été sélectionnés lors de nos études de faisabilité de 2021, 2022 et 2023¹.

Lors de l'extraction de la Tapisserie puis de son stockage, la difficulté majeure a résidé dans le fait de trouver le bon équilibre entre la vigilance sur les éventuelles contraintes ou tensions ; et la sécurisation et le maintien de la Tapisserie par une très légère pression. Nous avons agi de même pour le paravent 2 et le fac-simile de la Tapisserie en ayant les mêmes démarches.

Le paravent a été équipé de différents matériaux visant "à sécuriser" le fac-simile au moment du retournement à l'horizontale et de son déplacement.

- En premier lieu les panneaux de polycarbonate ont été recouverts de plaques de plastazote (mousse de polyéthylène) noires d'1 cm d'épaisseur, collées à l'aide de scotch double face (adhésif acrylique).
- Des tubes de mousse (PE) sont disposés au niveau des charnières pour accompagner le fac simulé au moment de rabattre les panneaux. Des tubes fins (4 cm de diamètre) pour l'espace interne et d'autres plus épais (7,8 cm de diamètre) ont été placés à l'extérieur du dispositif. Ils sont accrochés par le haut à la structure en aluminium grâce à des liens en Tyvek®. Les tubes fins, en contact avec la face du fac-simile, sont habillés de Tyvek® pour éviter tout frottement (essentiel sur la broderie de Bayeux) tandis que les tubes larges sont recouverts de jersey de coton tubulaire pour une bonne accroche à la toile de coton au revers et un bon maintien.
- Des calages en ouate de polyester sous forme de nappe d'environ 4 cm d'épaisseur recouverts de Tyvek® sont insérés entre les deux faces du facsimile au moment de refermer les panneaux. Ces sortes de matelas permettent de maintenir une très légère pression à l'intérieur des panneaux, pour éviter que "la Tapisserie" ne bouge. Grâce à leur souplesse, ces « matelas » servent de tamponnage, pour ne pas l'écraser. Une extrémité

¹ Étude de faisabilité 2021. A propos de l'extraction de la Tapisserie de sa vitrine en fer à cheval, p. 32 à 34.

Étude complémentaire sur un éventuel transport transfrontalier 2022 p. 20 à 23 et p.28-30

Étude sur le conditionnement de la Tapisserie de Bayeux, 2023 p. 6 à 8.

du matelas est prolongée par 20cm de Tyvek® pour recouvrir les tubes externes et protéger “la broderie” des frottements extérieurs.



Figure 113 : Hélène Cordier, Technicienne de Conservation, entrain de coudre les « matelas »



Figure 114 : Ensemble des « matelas » prêts à être emballés : les liens blancs serviront à les suspendre et les maintenir en place

- Des mousses en plastazote noire découpées en forme de « peigne » maintiennent les tubes externes en haut et en bas une fois le paravent fermé. Cela permet le maintien de leur écartement et évite un affaissement après retournement.



Figure 115 : Habillage des panneaux en polycarbonate de plastazote noir. Calages : tubes internes, tubes externes et tamponnages en ouate de polyester recouverte de Tyvek®. ©Th. BOUZID



Figure 116 : Modules en plastazote, permettant de sécuriser les tubes externes. ©Th. BOUZID

6.4. Méthodologie de fabrication du fac-simile

L'objectif du fac-simile est de pouvoir effectuer l'ensemble des tests des transports à blanc en se rapprochant au maximum des paramètres de la vraie Tapisserie : un paravent dans lequel est suspendu un textile souple, multicouches et multi matériaux, de très grandes dimensions, rigidifié dans sa partie supérieure par le dosseret, et resserré en partie basse par un galon.

Pour sa fabrication, il était impossible de reproduire les dégradations et la vulnérabilité de la Tapisserie de Bayeux. Nous avons donc utilisé en toute connaissance de cause des tissus modernes. Un premier fac-simile de 19 mètres de long avait été réalisé pour notre étude de 2021.

Nous avons donc poursuivi sa fabrication à l'aide de plusieurs éléments :

1. Un fac-simile de la broderie comprenant :

- Une toile de coton (coton lavée RAUCH) pour figurer la Tapisserie à proprement parler, avec des autocollants pour différencier la face du revers. Une toile de lin (comme le fond de la broderie) aurait représenté un coût disproportionné sans nous apporter un comportement beaucoup plus proche de l'original ;

- Les restes d'un "dosseret", d'environ 10 cm, sur lequel est cousue la broderie le long de son bord supérieur, à environ 4cm sous le bord du dosseret. Ce faux dosseret est constitué de plusieurs couches pour obtenir la même épaisseur et la même rigidité que l'original :

- Une toile épaisse en 100% lin, fortement encollée, associée à une couche de crin de polyester pour reproduire la raideur de celle d'origine
- Une couche de molleton de coton épais très similaire à l'original
- Une toile de lin mélangé blanche qui entoure l'ensemble, pour se rapprocher de la toile d'habillage du dosseret en termes d'épaisseur et de texture
- Un galon de coton blanc, cousu en partie basse de la toile représentant la borderie ;
- Une seconde toile de coton identique à la face, cousue au revers et remplaçant la doublure 18^{ème}.



Figure 117 : Découpe de tous les éléments à assembler.



Figure 118 : Les différentes couches de la copie du dossieret



Figure 119 : Faux dossieret fini : le fac-similé de broderie sera cousu 4 cm sous le bord supérieur



Figure 120 : Couture des 50m de fac-similé



Figure 121 : Le fac-simile de la broderie cousu sur le dossier, avec son galon en partie basse



Figure 122 : Les 69m du fac-similé

7. Une doublure de protection (en toile coton également) identique à celle apposée au dos de la Tapisserie. Elle est, de la même manière, coupée tous les 2,50m pour s'adapter à la largeur des panneaux du paravent. Des pinces en plastiques maintiennent cette doublure disposées au dos du fac-similé sur toute sa longueur

L'ensemble est accroché dans le paravent par un système de pinces métalliques et des mousquetons métalliques identiques à ceux de la Tapisserie.

- Pinces métalliques en remplacement des "galets"
- Mousquetons pour accrocher le fac simulé aux câbles internes aux panneaux.

Le fac simulé équipé est placé à l'intérieur du paravent sur les câbles tendus.



Figure 123 : Mise en place des pinces et mousquetons le long du fac simulé

8. Conclusion

Le présent rapport restitue l'ensemble des études complémentaires conduites par le Groupement SMACH dans le cadre du prêt transfrontalier de la Tapisserie de Bayeux au British Museum. Il s'appuie sur deux campagnes instrumentées — transport test aller-retour Bayeux–Londres en février 2026 et voyage à blanc Bayeux–British Museum en avril 2026 — et établit un corpus de données et de recommandations destiné à sécuriser le transport réel de juillet 2026.

Caractérisation de l'environnement vibratoire. Les mesures réalisées avec la chaîne d'acquisition triaxiale (échantillonnage 13 kHz, complétée d'un capteur chocs/T/HR/pression) ont permis de caractériser quantitativement les sollicitations mécaniques sur l'ensemble du parcours. L'énergie vibratoire est concentrée en deçà de 160 Hz, conformément à la littérature sur le transport routier. Le réseau routier britannique génère des amplitudes plus élevées et plus continues que le réseau français, du fait d'une rugosité de surface plus marquée. Pour la [REDACTED] le maintien de la vitesse normale [REDACTED] doit être respecté, et [REDACTED] est une mesure opérationnelle déterminante pour réduire l'exposition aux chocs transitoires [REDACTED]

Cartographie spatiale de la transmissibilité du paravent. Le déploiement de cinq capteurs sur le panneau 2 et d'un capteur central sur le panneau 27 a permis de produire une caractérisation spatialement résolue du comportement vibratoire du paravent, qui constitue une contribution méthodologique notable de l'étude. Les profilés aluminium agissent comme des filtres passifs des composantes dans le plan, indépendamment de leur orientation : les positions périphériques présentent une atténuation stable des vibrations latérales et longitudinales, indépendante du type de revêtement. Le centre du panneau, en revanche, est le siège d'un mécanisme non linéaire de contact intermittent (adhérence–glissement) entre le panneau de polycarbonate et son cadre, qui produit une transmissibilité dépendante du régime d'excitation. L'amplification verticale, signature du premier mode de flexion hors-plan, est observée systématiquement à toutes les positions.

Limites scientifiques assumées. Les propriétés mécaniques de la Tapisserie originale (raideur effective, amortissement, état de fragilisation des fibres) ne sont pas connues avec une précision suffisante pour définir un seuil de dommage vibratoire absolu scientifiquement défendable. La stratégie d'évaluation s'appuie en conséquence sur des indicateurs relatifs (transmissibilité, amplification résonante, exposition cumulée aux régimes critiques) et sur la minimisation des excitations rapides et répétitives dans les bandes basse fréquence sensibles.

Validation opérationnelle du dispositif HIZKIA U+. L'approche multi-barrières (caisse externe à amortisseurs, caisse interne climatique, paravent) est validée dans son principe et dans sa mise

en œuvre. La régulation climatique du camion et de la caisse interne dépasse les exigences de la classe A1 des recommandations muséales ASHRAE. Les opérations de manutention observées confirment l'importance d'équipes spécifiquement formées au montage et démontage de la caisse HIZKIA U+, de moyens adaptés (portique d'au moins 3,80 m hors tout, interfaces de franchissement) et d'un calage/arrimage maîtrisé.

Recommandations opérationnelles pour le transport réel. Plusieurs dispositions, déduites des observations des deux transports d'essai, sont à coordonner [REDACTED]

[REDACTED]
Ces dispositions seront coordonnées au prochain [REDACTED]

Perspectives d'analyse consolidée. Trois axes d'approfondissement restent à conduire. La validation rigoureuse du mécanisme non linéaire identifié au centre du panneau exigerait soit une analyse modale opérationnelle exploitant les cinq capteurs comme un réseau distribué, soit une campagne d'essais contrôlés sur banc instrumenté avec excitation calibrée à plusieurs niveaux d'amplitude. L'évaluation quantitative de la transmissibilité matelas / Plastazote → fac-similé reste à produire pour caractériser l'environnement vibratoire effectivement perçu par l'objet textile. Enfin, des mesures d'atténuation graduelles (suppression du jeu dans le profilé, augmentation de la rigidité hors-plan pour repousser le premier mode de flexion au-delà de 30 Hz, ajout éventuel d'un étage d'isolation accordé sous la bande critique) pourraient être prototypées et comparées par essais A/B sur fac-similé.

Synthèse. Les deux transports d'essai conduits dans le cadre du marché 2025-42-DRAC ont permis (i) de caractériser quantitativement l'environnement vibratoire du parcours Bayeux–British Museum, (ii) de produire une cartographie spatialement résolue du comportement vibratoire du paravent, (iii) de valider opérationnellement le dispositif HIZKIA U+ et les procédures de manutention associées, et (iv) d'identifier l'ensemble des dispositions opérationnelles à coordonner pour sécuriser le transport réel [REDACTED] Les éléments de méthodologie et d'instrumentation développés constituent un corpus reproductible et documenté, exploitable en l'état pour le transport réel.

9. Annexes

8.1. Fiche technique caisse

Fiches techniques de la caisse à télécharger : [fiches techniques.zip](#)

8.2. Fiche technique capteur

8.2.1. StaRT by SMACH

TYPE DE MESURE	accélération triaxiale, humidité relative, température
TEMPERATURE DE FONCTIONNEMENT	-10°C/50°C Sans condensation
SORTIE DISPONIBLE	USB Récupération des données : débit en USB 2.0 => 480Mb/s
PLAGE DE MESURE TEMPERATURE	-40°C/125°C précision +/-0.1°C typique
PLAGE DE MESURE HUMIDITE	0 to 100% précision +/-0.5% typique
CAPACITE MEMOIRE	32Go interne 4 jours de données environ
LE PLUS PRODUIT	Miniature et haute sensibilité à basse fréquence
ALIMENTATION	batterie interne Lithium sécurisée
MODE DE COMMUNICATION	Recharge par USB C, limitation du nombre de cycles, et support de la norme JEITA
RÉSISTANCE	Bluetooth IoT
Communication / Sortie	supérieur à IP54
	USB/Bluetooth : Remontée de statuts sur le serveur régulier en permanence, avec les alertes de vibration et de températures. Seuils réglables
Densité spectrale de bruit Vibration	75 µg/VHz sur ±2/±4/±8/±16 g sur une gamme de 70 à 2000 Hz
Fréquence d'échantillonnage vibration	13kHz, résolution 16bits

8.2.2. MSR175

Caractéristiques techniques

Boîtier :	Boîtier design, PC, scellé, étanche à l'eau (IP67).
Dimensions & Poids :	47 x 16 x 54 mm (L x H x L), env. 28 g
Médium :	Air, liquides div.
Capacité de mémoire :	Plus de 2 000 000 de mesures.
Bouton-poussoir :	Lancer l'enregistrement/Interroger l'état.
Capteurs d'accélération triaxiaux :	2 capteurs d'accélération triaxiaux intégrés
Plage de mesure :	±15 g et ±100 g (-20...+65 °C)
Précision :	Capteur 15 g : ±0,15 g (+25 °C) Capteur 100 g: jusqu'à 15 g ±2 g, jusqu'à 100 g ±5 g (à +25°C)
Taux de mesure / d'enregistrement :	Jusqu'à 6 400/s (±15 %).
Alimentation :	Batterie Li-Po (230 mAh), rechargeable via connexion USB, durée d'enregistrement jusqu'à 8 semaines.
Logiciel PC :	MSR175 Dashboard, MSR Report Generator, MSR ShockViewer version de base gratuite
Interface :	USB
Cond. de fonctionnement :	Température -20...+65 °C
Cond. de stockage :	+5 °C...+45 °C (condition idéal pour batterie) 10...95 % humidité relative, sans condensation
Normes :	Le MSR175 répond aux exigences de la directive européenne RoHS/WEEE.

Mesures	Plage de mesure	Précision	Taux de mesure / d'enregistrement
Température	-20...+65 °C	±0,5 °C (-10...+65 °C)	chaque 10 min.
Humidité relative	0...100 % humidité rel. -20...+65 °C	±2 % humidité rel. (10...85 %, 0...+40 °C) ±4 % humidité rel. (85...95 %, 0...+40 °C)	chaque 10 min.
Pression ambiante	-2 000 mbar absolu -20...+65 °C	±2,5 mbar (750...1 100 mbar absolu, +25 °C)	chaque 10 min.
Lumière	0...65 000 lx	Sensibilité max. à 500 nm	chaque 10 min.