



## Un “ référentiel vibrations ” pour les collections en transit

Michel Dubus, Gauthier Daire<sup>2</sup>, Joachim Dehan<sup>2</sup>, Louis Laire<sup>2</sup>, Abdelamine Tagmount<sup>2</sup>

### ► To cite this version:

Michel Dubus, Gauthier Daire<sup>2</sup>, Joachim Dehan<sup>2</sup>, Louis Laire<sup>2</sup>, Abdelamine Tagmount<sup>2</sup>. Un “ référentiel vibrations ” pour les collections en transit. Das Schwingungssymposium, Jun 2018, Mannheim, Allemagne. <hal-01907880>

**HAL Id: hal-01907880**

**<https://hal.science/hal-01907880v1>**

Submitted on 29 Oct 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L’archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d’enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

# Un « référentiel vibrations » pour les collections en transit.

Auteurs : Michel Dubus<sup>1</sup>, Gauthier Daire<sup>2</sup>, Joachim Dehan<sup>2</sup>, Louis Laitre<sup>2</sup>, Abdelamine Tagmount<sup>2</sup>

<sup>1</sup> conservateur du patrimoine, musée national de Port-Royal des Champs, route des Granges, 78114 Magny-les-Hameaux

<sup>2</sup> Supméca, 3 Rue Fernand Hainaut, 93400 Saint-Ouen

Mots-clés : musée, collections, peintures, transports, vibrations

Keywords: museum, collections, painting, transports, vibrations

## Résumé

En l'absence de lignes directrices il est difficile de savoir si les vibrations pourraient endommager les œuvres d'art durant leur transport. Nous avons donc enregistré ces vibrations avec des accéléromètres fixés sur les caisses et sur les œuvres de 2011 à 2016. Ces données constituent un référentiel qui permet d'optimiser les conditions des prêts, de spécifier des conditions d'expédition normales et anormales, d'auditer les environnements de transit et les pratiques de manutention, de vérifier les performances des caisses. Le voyage d'Olympia en Russie en 2016 illustre la méthode.

## Abstract

Because of the lack of guidelines it is difficult to evaluate the risk due to vibrations for an artwork in transit. Hence, vibrations on traveling artworks were measured with accelerometers from 2011 to 2016 to help understanding the mechanical hazards during journeys. This constitutes an experimental database that can be used to optimize loan conditions, to specify normal and abnormal shipping conditions, to audit environments of transit and handling practices and to check the performance of the crates. The journey of Olympia in Russia in 2016 illustrates the method.

## Introduction

Une exposition temporaire est synonyme de voyages. Une œuvre qui voyage est exposée à des risques de chocs, de chutes, de poinçonnements, à des vibrations, des variations de température et d'hygrométrie. Pour limiter ces risques, les agents de transport choisissent des véhicules chauffés, avec des suspensions pneumatiques, et optimisent les circuits logistiques; ils conçoivent aussi des emballages performants pour protéger au mieux les œuvres, en particulier contre les vibrations dont les conséquences sur les collections sont mal connues<sup>1</sup>.

Mais il est très possible qu'un grand nombre de trajets, même à faibles vibrations, entraîne des dommages cumulatifs sur les collections. Pour estimer ces risques, les vibrations ont été enregistrées par le Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF) au cours de vingt-six voyages en camion (10 000 km cumulés) et dix voyages en avion (90 000 km cumulés); ces données ont été annotées minutieusement à chaque étape (manipulations, emballage-déballage, déplacements dans les musées, transbordements) et peuvent servir de référence pour évaluer chaque nouveau transport. Une illustration en est donnée ici à travers l'exemple du voyage de l'Olympia de Manet en Russie en 2016.

---

<sup>1</sup> NF EN 16648 Octobre 2015 Conservation du patrimoine culturel - Méthodes de transport

# Résultats

## Camion ou avion?

Les mesures issues des capteurs donnent des niveaux vibratoires interprétés comme des accélérations vues par les œuvres ou les caisses. Par exemple, l'accélération de la pesanteur (ou gravité) représente un niveau constant de  $9,81 \text{ m/s}^2$  (ou  $1g$ ). Les accélérations mesurées sont traduites en niveaux moyens, notés  $g \text{ RMS}^2$ . Les capteurs sont orientés de manière à recueillir les accélérations longitudinales (sens du mouvement), latérales et verticales. Ces mesures montrent que les vibrations sont plus importantes en camion qu'en avion.

En camion les vibrations sont environ 1,3 fois plus grandes sur les œuvres que sur les caisses, aussi bien en termes de niveaux vibratoires que de variabilité de ces niveaux. Les semi-remorques ont les mêmes performances que les camions porteurs classiques, du moment qu'ils sont équipés de suspensions pneumatiques<sup>3</sup>.

En avion, les niveaux de vibrations sont de même intensité sur les caisses et sur les œuvres et cela dans chaque direction : l'orientation de la caisse n'a donc pas d'importance, ce qui permet d'optimiser la disposition des caisses sur une palette sans avoir à l'orienter par rapport à la direction de vol (figure 1). Les transbordements aux aéroports provoquent des vibrations importantes (voir encadré 2).

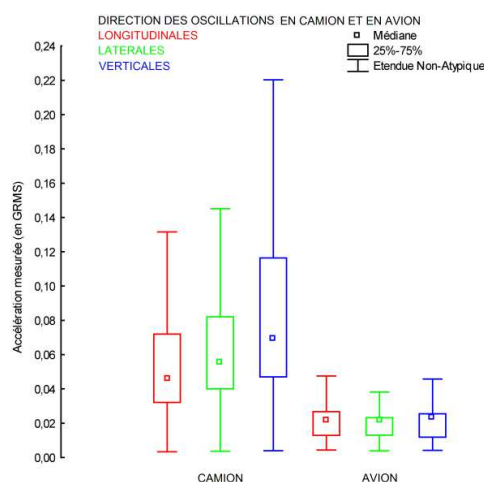


Figure 1 : accélérations médianes (g RMS) représentant l'intensité des vibrations sur les caisses en camion et en avion dans les trois directions.

## Les caisses

Les performances anti-vibrations des caisses sont aléatoires dans les trois directions. Selon les fréquences, les vibrations sur les œuvres sont soit amplifiées (résonnance), soit atténuées

<sup>2</sup> De « root mean square » ou moyenne quadratique ; la moyenne quadratique d'un ensemble de nombre est la racine carrée de la moyenne des carrés de ces nombres. Soient  $N$  nombres,  $a_1$  à  $a_N$ . La moyenne quadratique de ces  $N$  nombres vaut :

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (a_i)^2}$$

<sup>3</sup> NF EN 15946 Octobre 2011 Conservation des biens culturels - Principes d'emballage pour le transport

(amortissement). Verticalement, les vibrations sont deux fois plus importantes sur les œuvres que sur les caisses. Dans les autres directions elles sont du même ordre de grandeur (figure 2).

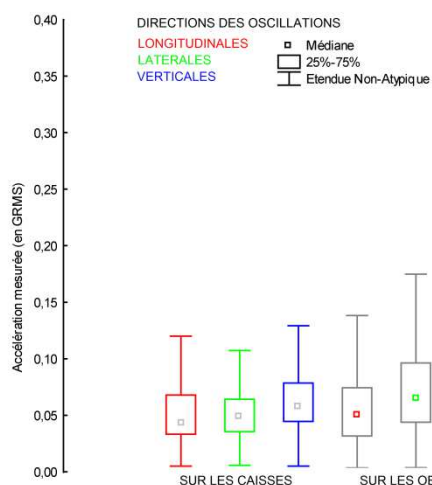


Figure 2 : comparaison des accélérations médianes (g RMS) représentant l'intensité des vibrations sur les caisses et sur les œuvres, dans les trois directions.

Les caisses isotherme et super isotherme atténuent mieux les vibrations que les caisses simples, peut-être grâce à l'isolation thermique en polystyrène extrudé. Une bonne raison pour soigner l'emballage des œuvres destinées à être transportées sur de longues distances (figure 3).

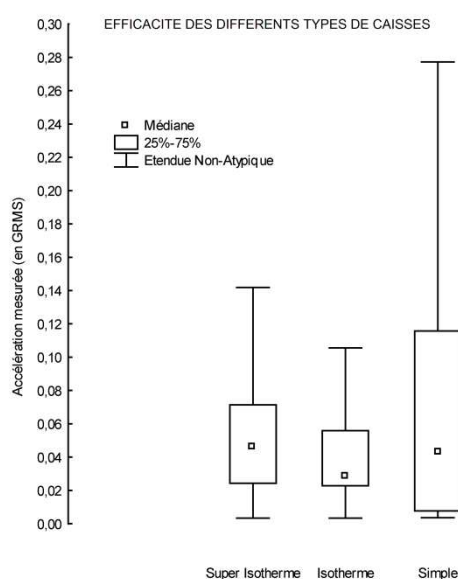


Figure 3 : comparaison des accélérations dans les caisses isothermes (5 cm de polystyrène extrudé) super isothermes (10 cm de polystyrène extrudé) et simples (sans polystyrène extrudé).

## Distances

Les mesures sont beaucoup plus dispersées pour des trajets entre musées et aéroports que pour de longs voyages en camion sur autoroutes; coups de freins, bouchons, travaux, ralentisseurs, pourraient être à l'origine de ces différences. Il ne faut donc pas négliger la qualité des emballages pour les trajets courts (figure 4).

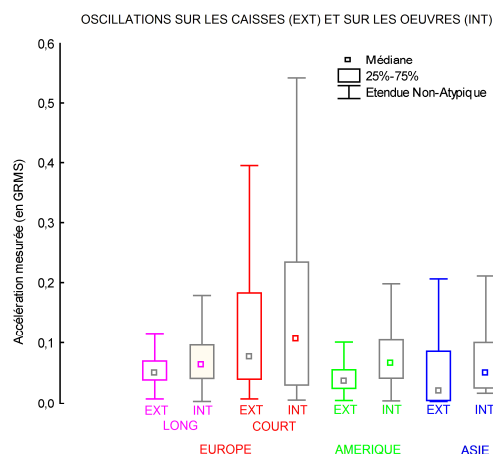


Figure 4 : accélérations sur les caisses et les œuvres en fonction de la distance parcourue en Europe, en Amérique du Nord et en Asie.

## Étude de cas : Olympia

L'Olympia de Manet (RF644) est une peinture rentoilée à la colle de pâte, le fond est déchiré en deux endroits, la couche picturale est craquelée au niveau du corps, elle est donc considérée comme très fragile et n'est pas censée voyager (figure 5).



Figure 5 : photographie d'un détail de l'Olympia en 1951 ©C2RMF.

Malgré ces recommandations, la peinture a déjà été transportée en camion pour l'exposition *Manet, Ritorno a Venezia* du 24 avril au 1<sup>er</sup> septembre 2013; en 2016, le musée d'Orsay s'apprête à l'expédier par camion au musée des Beaux-arts Pouchkine de Moscou (du 18 avril au 15 juillet), puis au musée de l'Ermitage à Saint-Petersbourg pour l'exposition *Edouard Manet, Olympia, Thème et variation* (du 3 août au 30 octobre).

### *De Paris à Moscou.*

A l'origine du projet, le voyage de Paris à Moscou (2850 km) est donc prévu en camion, soit environ 30 heures de route équivalant à presque 5,5 millions de cycles à une valeur médiane de 0,06 g RMS (valeur médiane établie à partir des données enregistrées sur les caisses au cours de précédents voyages en camion).

Un voyage en avion consiste en 6 heures de vol entre les aéroports de Paris Charles-De-Gaulle (CDG) et de Moscou Sheremetyevo (SVO) pour l'aller et le retour, ce qui équivaut à environ 400 000 cycles à 0,02 g RMS (estimation faite à partir de la valeur médiane des données enregistrées sur les caisses au

cours de précédents voyages en avion). A ce trajet, il faut ajouter 4 heures de camion aller-retour (pour le transport de Paris à CDG et de SVO à Moscou (respectivement 180 000 et 200 000 cycles à 0,1 g RMS).

Sur la base de cette estimation, l'avion a donc été préféré au camion pour limiter l'intensité des vibrations.

## Résultats

Pour les deux trajets en camion entre les musées et les aéroports, les niveaux vibratoires mesurés sur la caisse et sur l'œuvre sont très inférieurs aux niveaux de référence : la caisse amortit efficacement les vibrations dans toutes les directions (figure 6).

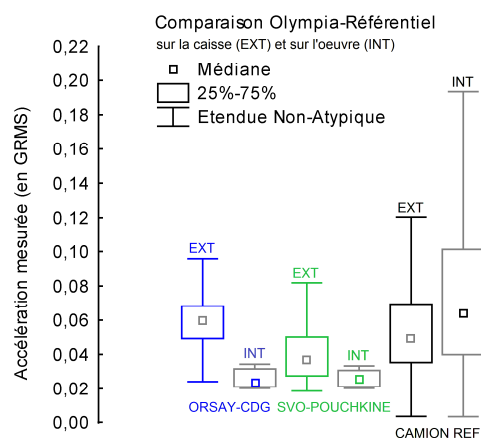


Figure 6 : comparaison avec les niveaux de référence des niveaux vibratoires mesurés sur la caisse et sur Olympia entre le musée d'Orsay et l'aéroport CDG et entre l'aéroport SVO et le musée Pouchkine.

## Conclusions

Cette méthode permet de choisir les moyens de transports les mieux adaptés aux œuvres, d'auditer en vraie grandeur les environnements de transit, les pratiques de manutention, les performances des emballages et de vérifier si les conditions d'expédition sont acceptables.

Par exemple, nous avons appris que, quelle que soit la durée du transport et la distance parcourue, un soin particulier doit être apporté à l'emballage. Les œuvres vibrent systématiquement plus que la caisse dans la direction verticale ; pour améliorer les emballages, il serait nécessaire d'identifier les modalités responsables de l'amplification de ces vibrations.

Semi-remorque ou porteur, le type de camion n'a pas d'influence sur les vibrations, ce sont les suspensions pneumatiques qui sont importantes.

En avion, les vibrations sont de même niveau sur la caisse et sur l'œuvre, quelle que soit l'orientation de la caisse. Contrairement aux idées reçues, il n'est donc pas nécessaire de respecter la direction de vol. Mais les transbordements aux aéroports provoquent des vibrations importantes et les risques vibratoires sur la route sont plus grands entre le musée et l'aéroport que sur de longues distances sur autoroutes.

Cette base de données permet de prévoir les risques et de vérifier les points critiques d'un transport par comparaison avec les enregistrements précédents. Au-delà du traitement a posteriori, ces données annotées ont été utilisées pour gérer les risques liés aux transports d'œuvres de façon

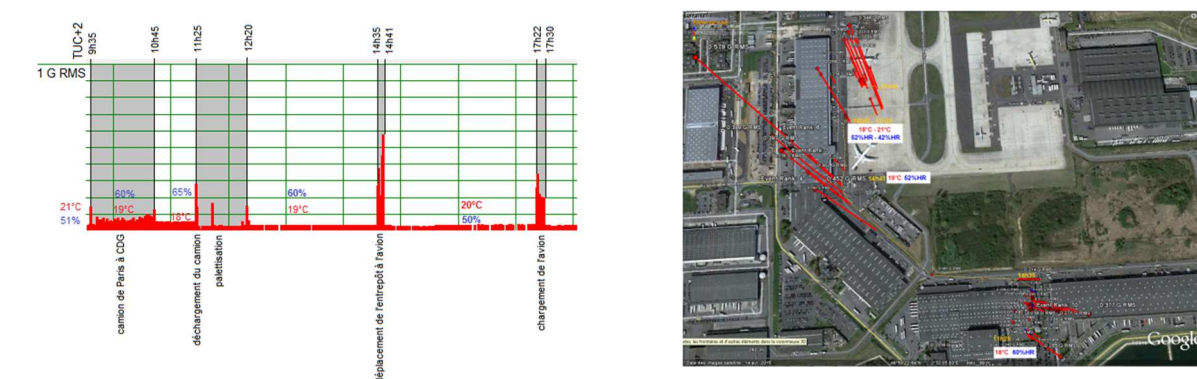
proactive par extraction de données et traitement d'évènements complexes, dans le cadre d'une thèse financée par la fondation des sciences du patrimoine (LabEx Patrima).<sup>4</sup>

## Le voyage d'Olympia

### *13 avril 2016, du musée d'Orsay à l'aéroport Paris Charles de Gaulle (CDG)*

La caisse est transportée du musée d'Orsay à l'aéroport entre 9h35 et 10h35 (temps universel coordonné +2). Elle est déchargée à 11h25 et mise sur palette. Les vibrations les plus importantes sont enregistrées à 14h35 lorsque la palette est apportée près de l'avion. Elle y reste de 14h45 à 17h20, heure du chargement dans l'avion, la température étant comprise entre 18 et 21°C. Le chargement terminé à 17h45, l'avion décolle à 19h15 (figure 1).

Figure 1 : Série temporelle et géo localisation des évènements à l'aéroport CDG.



### *14 avril 2016, de l'aéroport Sheremetyevo (SVO) au musée Pouchkine*

Dans l'avion la température descend à 15°C, l'humidité à 30%. L'avion atterrit le 14 avril à 0h15 (temps universel coordonné : +3). La caisse est déchargée à 0h30 et transportée vers l'entrepôt de l'autre côté de la plaine à 0h40, où elle arrive à 1h15 ; c'est à cette étape que les vibrations les plus importantes sont enregistrées. Elle passe la nuit à l'entrepôt. Elle est chargée dans le camion entre 12h40 et 12h50 (figure 2).



<sup>4</sup> Raef MOUSHEIMISH, Combinaison de l'internet des objets, du traitement d'évènements complexes et de la classification de séries temporelles pour une gestion proactive du processus métier, thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay préparée à l'université de Versailles Saint Quentin en Yvelines, soutenue le 27 octobre 2017, 147 p.

Figure 2 : Série temporelle et géo localisation des évènements à l'aéroport SVO.

## Annexe 1 : matériel et méthodes

Des enregistreurs Lansmont<sup>5</sup>, modèle Saver 9X30 enregistrent la date et l'heure, la température, l'humidité, la pression, les coordonnées géographiques, les accélérations moyennes (g RMS), les chocs (valeur maximale de l'accélération pour chaque canal, durée et variation de vitesse) et la densité spectrale de puissance ( $g^2/Hz$ ) dans les trois directions. Un GPS permet de localiser précisément chaque évènement. De petits accéléromètres triaxiaux (PCB Piezotronics, modèle 340A50) fixés au plus près des œuvres (socle des sculptures, dos de protection châssis ou cadres des peintures), sont connectés à chaque centrale d'acquisition. Ce matériel permet d'enregistrer des accélérations jusqu'à 200 g, avec une fréquence d'échantillonnage comprise entre 500 Hz et 10kHz; la sensibilité est de 0,3 à 30,0 pC/g, la mémoire de 128Mbits. Les conditions d'acquisition sont programmées avec le logiciel SaverXware. La mémoire est structurée en deux parties :

- i) enregistrements à intervalles de temps réguliers pendant une durée définie (par exemple toutes les minutes, 2048 points mesurés à la fréquence d'échantillonnage de 2500 Hz).
- ii) mesures enregistrées sur dépassement de seuil (par exemple si l'accélération dépasse la valeur de 1 g, elle est enregistrée, 20% du signal étant enregistré avant le dépassement constaté dans la mémoire).

Les convoyeurs consignent l'emplacement des capteurs, les directions propres à chaque canal, les caractéristiques des caisses (simple, isotherme, super isotherme), des véhicules (camion porteur, semi-remorque ou avion), à chaque étape du voyage (manutention dans les musées, transports en camion et en avion, transbordements). Ces informations permettent de comparer les performances des emballages et des véhicules, de vérifier quels trajets sont les moins impactant, selon leur longueur et leur durée (musée-aéroport ou longues distances pendant une journée ou plus).

Le traitement statistique a été réalisé de la façon suivante<sup>6</sup> : l'écart interquartile est fixé comme la différence du 3<sup>ème</sup> quartile (valeur au-delà de laquelle se trouvent 25% des données) et du 1<sup>er</sup> quartile (valeur au-delà de laquelle se trouvent 75% des données). Les valeurs aberrantes sont écartées. Une valeur est considérée comme aberrante si elle est supérieure à la valeur du 3<sup>e</sup> quartile, plus 1,5 fois la différence entre le 3<sup>e</sup> et le 1<sup>er</sup> quartile (1,5 représente le coefficient d'aberration généralement utilisé), ou si une valeur est inférieure à la valeur du 1<sup>er</sup> quartile moins 1,5 fois la différence entre le 3<sup>e</sup> et le premier quartile.

$$\begin{cases} V_{point} > VSE + 1,5 * (VSE - VIE) \\ V_{point} < VIE - 1,5 * (VSE - VIE) \end{cases}$$

VSE = valeur supérieure de l'étendue interquartile (valeur du 3<sup>e</sup> quartile).

VIE = valeur inférieure de l'étendue interquartile (valeur du 1<sup>er</sup> quartile).

L'étendue non atypique est l'ensemble des valeurs non comprises dans l'écart interquartile et non considérées comme atypiques. De cette façon, si, au cours d'un transport, des valeurs exotiques ont été enregistrées, elles seront exclues de la représentation et n'influeront pas le référentiel de façon significative. Seuls les mouvements sont pris en compte, les temps d'arrêt, non représentatifs, sont exclus du traitement statistique.

---

<sup>5</sup> Lansmont « Field to lab » (page consultée le 19/02/2018), [En ligne], Adresse URL : <http://www.lansmont.com/>

<sup>6</sup> Statistica « Boîtes à moustaches en 2D » (page consultée le 19/02/2018), [En ligne], Adresse URL : <http://www.statsoft.fr/logiciels/logiciels.htm> accédé le 11/10/2017



Des boîtes à moustaches permettent de visualiser la distribution des mesures et l'intensité de la relation entre une ou plusieurs variables.

## Annexe 2 : liste des transports étudiés

*Surrealism*, Gallery of modern art, Brisbane, *statuette anthropomorphe de Nicobar* (inv. 70 2003 9 1), rapport du 25/07/2011

*Corot. L'armoire secrète. Une liseuse dans son contexte*, Collection Oskar Reinhart, Winterthur, 24 février-15 mai 2011, Corot, *La femme à la perle* (RF 2040), rapport du 08/09/2011

De la Beauté et de la Mort : Natures mortes animalières de la Renaissance à l'Art moderne, Staatliche Kunsthalle, Karlsruhe, 7-8 novembre 2011, Rubens, Philopœmen, général des Achéens, reconnu par ses hôtes de Mégare (M.I. 967), rapport du 13/10/2011

*I quadri del re*, Venaria Reale, Turin, du 5 avril au 9 septembre 2012, Wouvermans, *Halte de militaires faisant boire leurs chevaux* (inv 1962), rapport du 19/09/2012

*La sculpture de danse*, Georg Kolbe Museum, Berlin, du 26 février au 28 mai 2012, Rodin, *statuette en bronze*, rapport du 04/01/2013

*Impressionism and Open-air Painting. From Corot to Van Gogh*, Thyssen-Bornemisza, Madrid, du 5 février au 12 mai 2013, Valenciennes, *L'orage* (RF2990), rapport du 12/06/2013

*Seduced by Art : Photography Past and Present*, Caixa Forum, Madrid, du 19 juin au 15 septembre 2013, Villot, *La mort de Sardanapale* (RF 1962 26), rapport du 08/10/2013

*Modern woman : daughters and lovers*, Queensland art gallery, Brisbane, du 24 mars au 24 juin 2012, Berthe Morisot, *Portrait de madame Edma Pontillon* (RF5262), rapport du 28/10/2013

*La Méditerranée dans les collections du Louvre*, Musée Métropolitain, Tokyo, du 20 juillet au 23 septembre 2013, Musée national de Chine, Pékin, du 29 Octobre 2013 au 10 Février 2014, RF 2011 56, rapport du 14/03/2014

Risques mécaniques et climatiques du trajet Paris – Abu Dhabi, rapport du 18/08/2014

*Willem II et Anna Pavlovna, Royal splendour at the Dutch Court*, Musée de l'Hermitage, Saint Pétersbourg, 24 September 2013 - 19 January 2014, Memling, *La fuite en Egypte* (RF 1974 30) / *Saint-Jean Baptiste* (RF 1453) / *Sainte Madeleine* (RF 1454), rapport du 12/09/2014

Identification des points critiques du parcours Paris-Lens, projet d'externalisation des collections du musée du Louvre vers Liévin, étude réalisée dans le cadre du Labex Patrima, rapport du 30/06/2015

*Bonnard*, fondation Mapfre, Madrid, du 31 août au 5 septembre 2015, Bonnard, *L'enfant au pâté de sable* (RF 1982 69) / *En barque*, (RF 1977 73), rapport du 05/11/2015

*Pierre Bonnard: Painting Arcadia*, Legion of Honour, San Francisco, du 6/02 au 15/05/2016, Bonnard, *En Barque* (RF 1977 73) / *La toilette* (RF 1977 62, LUX 22), rapport du 04/08/2016

*La Porte de l'Enfer*, Museo Soumaya, Mexico, du 4 juin au 11 septembre 2016, Rodin, *Adam* (S.1303) / *Le baiser*, (S.2834), rapport du 05/08/2016

*Edouard Manet, Olympia, Thème et variation*, Musée Pouchkine, Moscou, du 18 avril au 15 juillet 2016 / Musée de l'Ermitage, Saint-Pétersbourg, du 3 août au 30 octobre 2016, Edouard Manet, *Olympia* (RF 644), rapport du 25/11/2016

## Remerciements

Les auteurs remercient Muriel Quillien et Tony Da Silva, professeurs à l'Institut supérieur de mécanique de Paris, pour la relecture attentive de cet article.