

Ils ont utilisé pour en faire des choses auxquelles nous n'avions pas pensé, ce qui était passionnant. Une personne a posté une vidéo montrant des mouvements fœtaux en fin de grossesse. Une étudiante en art a réalisé une vidéo mettant en évidence les expressions et mouvements imperceptibles de ses amis qui essayaient de rester immobiles.

Notre approche eulérienne a tout de même ses limites. Si un pixel d'entrée donné s'assombrit beaucoup d'une image à la suivante, l'ordinateur accentue trop ce changement, produisant un pixel complètement noir par un effet d'amplification incontrôlé. Ce type de problème crée des halos sombres ou lumineux autour des zones de mouvement. Par ailleurs, les variations de couleur d'entrée liées au bruit du capteur posent aussi problème parce que, même si nous les lisons en

faisant une moyenne locale sur un grand nombre de pixels, le bruit reste amplifié.

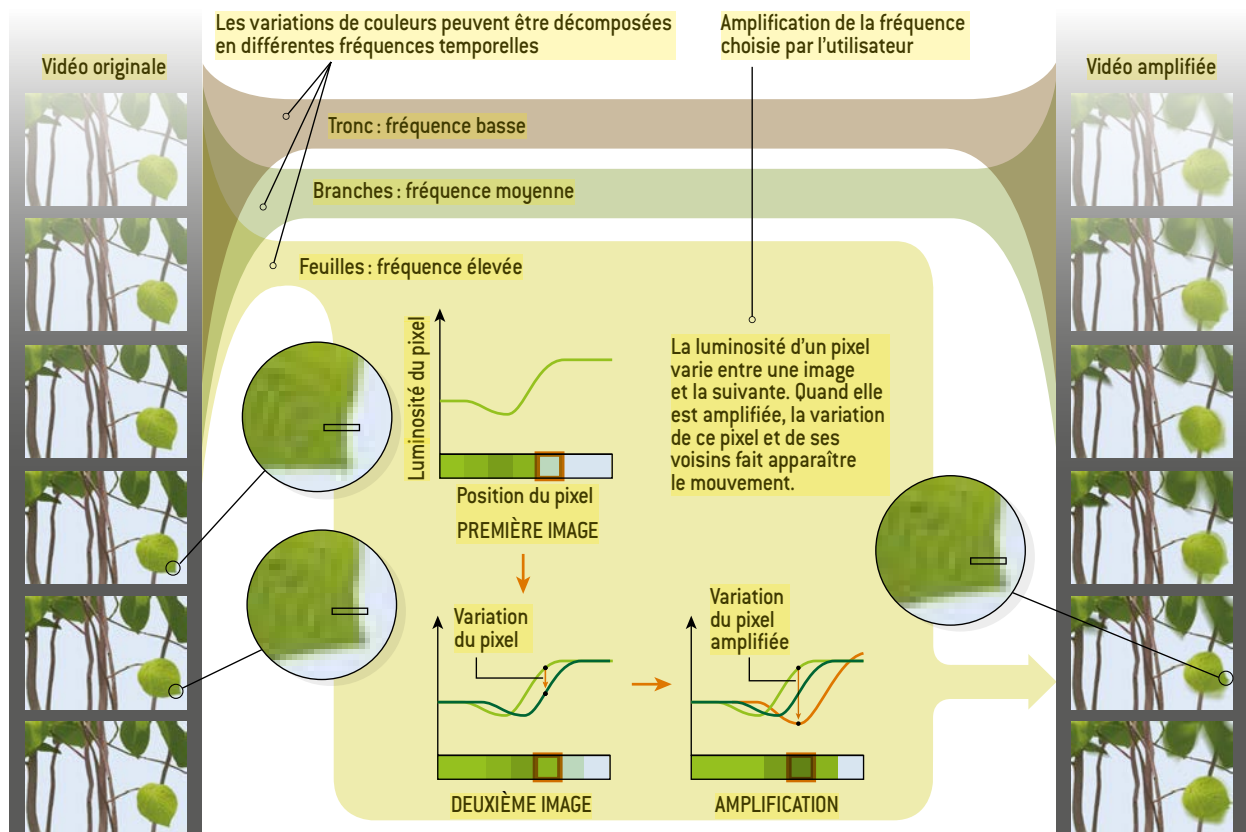
Ces résultats nous ont incités, avec notre étudiant en thèse Neal Wadhwa, à développer un nouvel algorithme qui préserve les bénéfices des approches eulériennes simples tout en donnant une meilleure vision quand les changements deviennent extrêmes.

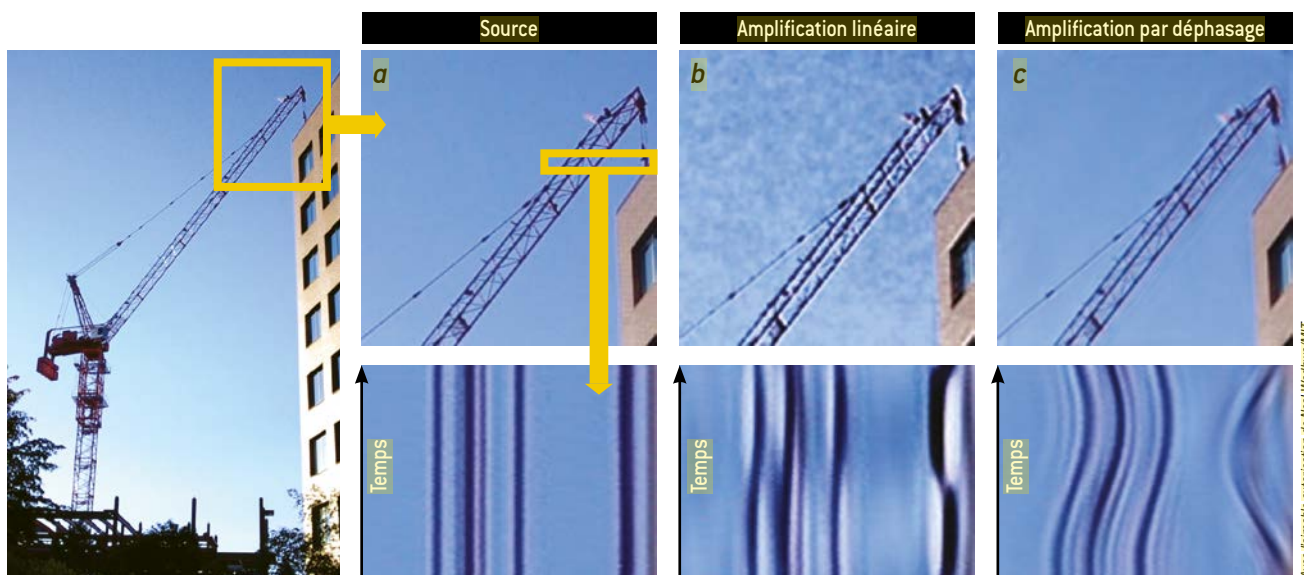
Nous nous sommes rendu compte que l'origine des limites de notre méthode initiale est qu'elle traite de la même façon les bords et les zones uniformes qui les entourent, alors que les bords correspondent à des différences de couleurs beaucoup plus grandes (des gradients plus importants). Ainsi, si vous essayez d'amplifier tous les pixels avec le même facteur et en même temps, vous obtenez des distorsions (des effets de saturation) qui ne correspondent pas à des mouvements réels.

Au lieu d'amplifier avec un même facteur, nous avons opté en 2013 pour une approche plus fine qui utilise des techniques modernes de traitement du signal et de l'image. De façon analogue à une décomposition classique de Fourier où le signal est représenté par une somme de fonctions sinusoïdales, nous modélisons l'image (l'ensemble de ses pixels) par une somme de fonctions appropriées, selon une technique dite de pyramides qui analyse plusieurs échelles de résolution. De la même façon qu'un changement de phase des fonctions sinusoïdales dans une analyse de Fourier correspond à une translation, un changement de phase des fonctions utilisées dans notre approche correspond à un mouvement local dans un groupe de pixels de l'image. Cette technique permet de caractériser plus facilement l'ampleur du mouvement qui sépare deux images

TRANSFORMER LES CHANGEMENTS DE COULEUR EN MOUVEMENT

Sur une vidéo, chaque pixel représente un point d'un objet, une feuille d'arbre par exemple. La couleur de ce pixel change au cours du temps avec le mouvement de la feuille, même de façon imperceptible, parce que la feuille bouge par rapport à la lumière qui l'atteint. Un programme informatique qui amplifie les variations de couleurs d'une image à la suivante amplifie également les minuscules mouvements qui deviennent alors visibles à l'œil nu. Les chercheurs peuvent isoler et amplifier certaines fréquences en jeu, par exemple celles correspondant au tremblement des feuilles ; dans ce cas, on fait ressortir le mouvement des feuilles par rapport à celui de l'ensemble de l'arbre, les branches bougeant à un rythme plus lent.





CETTE GRUE OSCILLE DANS LE VENT de façon imperceptible (a), même si l'on isole une ligne de pixels dont on examine l'évolution au fil du temps en accolant verticalement la même ligne image par image (en bas). En utilisant l'amplification linéaire des couleurs, l'image obtenue est bruitée (b). On distingue des mouvements dans la ligne de pixels, mais des artefacts lumineux et sombres sont présents. La technique d'amplification des auteurs, fondée sur le déphasage, met en évidence le mouvement de la grue sans artefacts (c).

d'une vidéo, et cela sans créer d'artefacts tels que des halos.

Après avoir résolu ces difficultés, nous avons mis à l'épreuve notre microscope du mouvement pour enregistrer des vibrations qui n'avaient jamais été observées, mais seulement prévues théoriquement ou obtenues par simulations numériques. Par exemple, l'enveloppe externe d'un tuyau en PVC est un objet simple. Quand on frappe le tuyau avec un marteau, son enveloppe se courbe et vibre selon des motifs particuliers qui oscillent à différentes fréquences. Les motifs sont décrits théoriquement dans les manuels d'ingénierie, mais il était difficile de visualiser des déformations aussi petites.

Nous avons pris des vidéos à grande vitesse de tuyaux soumis à des coups. Dans la vidéo non traitée, la déformation de la forme circulaire est pratiquement invisible. Justin Chen, doctorant au MIT, a appliqué notre outil à la vidéo, en demandant à l'ordinateur de faire ressortir les trois modes d'oscillation de plus basse fréquence (nous avons appliqué le même principe pour visualiser le pouls humain, en recherchant seulement les changements de pixels qui correspondaient à la plage du rythme cardiaque). L'amplification de ces mouvements a montré que la coupe transversale du tuyau fléchissait alternativement vers l'intérieur et vers l'extérieur, comme prévu par les calculs.

Observer un verre à vin se casser sous la pression du son (des vibrations à haute

fréquence) est un autre exemple qui montre à quel point cette visualisation peut être spectaculaire. Nous avons tous vu des films dans lesquels une soprano atteint une note très haute et brise un verre. Mais aucun d'entre nous n'avait jamais vu la déformation du verre, parce qu'elle est en général d'amplitude à la fois trop faible et trop rapide, d'habitude autour de 300-500 hertz. Nous voulions montrer ces déformations en temps réel.

Le verre qui chante

À cette fin, nous avons appliqué une astuce que l'on doit à Harold Edgerton, pionnier de la stroboscopie, à savoir la prise de vues image par image. Il a montré que quand un mouvement périodique rapide est enregistré avec des durées brèves d'exposition pour chaque image, les images étant prises à une fréquence inférieure à celle du mouvement, ce dernier semble beaucoup plus lent qu'il ne l'est en réalité. Nous avons utilisé une caméra vidéo classique pour prendre de brèves vues du verre. Quand nous avons amplifié la vidéo au moyen de notre microscope du mouvement, cet effet stroboscopique nous a permis de voir un verre vibrer sous nos yeux dès qu'il était soumis à la note appropriée.

Outre les vibrations du verre à vin, la technique pourrait révéler des effets plus graves, comme des débuts de panne sur

de grosses machines. Le microscope peut détecter et visualiser de légers mouvements anormaux. Nous avons montré ce principe dans une vidéo à grande vitesse d'un moteur automobile tournant au ralenti qui semblait normal en apparence. Comme pour le tuyau, la vidéo brute ne montre aucun mouvement des parties mécaniques. Nous avons alors filtré la vidéo pour mettre en relief les vibrations du moteur à 22 hertz, en bloquant toutes les autres fréquences. Le grossissement d'un facteur 30 des changements filtrés a révélé que différents composants du moteur étaient secoués de part en part. Ce n'était pas anormal pour un moteur, mais cela montre que le microscope du mouvement peut extraire des bandes de fréquences particulières susceptibles de présenter des anomalies, en plus d'amplifier de petits changements afin de les visualiser. De telles vidéos pourraient mettre en lumière le dysfonctionnement de parties mécaniques dans des machines soumises à des rotations et à des vibrations.

Nous avons adopté une approche similaire pour montrer comment une grue géante est secouée par le vent (voir la figure ci-dessus). Bien que la grue semble rigide et immobile aux observateurs, le microscope du mouvement fait apparaître un fléchissement. Pour ces grues, il y a une gamme de mouvements normale, mais si la grue sort de cette gamme, elle peut se rompre.

Nous pouvons également traiter le processus en sens inverse. En utilisant le microscope du mouvement pour mettre en évidence les minuscules vibrations d'objets tels qu'un paquet de chips ou les feuilles d'une plante, nous avons, avec Wadhwa et Abe Davis du MIT et Gautham Mysore d'Adobe Research, reconstitué le type de bruit qui les secouait (par exemple la voix d'une personne dans la pièce). Si l'on appliquait cette méthode à une grosse turbine industrielle, par exemple, ou à la rampe de béton d'un terminus de bus, cela pourrait être un moyen d'identifier les sources de vibrations susceptibles de fragiliser la structure.

Dans l'écoulement d'un fluide, le microscope détecterait des phénomènes de turbulence. Autour de véhicules, qu'il s'agisse d'automobiles, d'avions ou de sous-marins, de telles turbulences ont un effet fortement négatif sur la vitesse de la machine. On ne peut pas discerner ces ondes sur des vidéos non traitées, mais quand on amplifie certaines fréquences de mouvement avec notre dispositif, les signes d'instabilité des ondes

se manifestent clairement pour l'observateur. Nous n'en sommes qu'aux prémices du microscope du mouvement, mais déjà les idées d'application sont nombreuses.

Parce que le logiciel est rapide et capable de traiter instantanément une vidéo pour révéler un phénomène invisible, on peut avoir l'impression de mettre des lunettes magiques ou d'être soudain doué d'une vision surhumaine. Mais ce n'est pas de la magie, ni le rêve d'un créateur de bandes dessinées. Cette technique est le résultat de recherches élémentaires en traitement vidéo et en représentation mathématique des images. Les chercheurs l'ont déjà exploitée pour mettre en évidence des phénomènes qu'ils n'avaient jamais pu voir de leurs propres yeux. Elle pourrait, comme les premiers microscopes optiques d'il y a trois ou quatre siècles, nous aider à identifier des risques pour la santé ou la sécurité. Pour l'instant, elle nous donne l'impression d'être des explorateurs, émerveillés de découvrir tout un monde de mouvements autour de nous, cachés sous nos yeux. ■

BIBLIOGRAPHIE

N. Wadhwa *et al.*, **Phase-based video motion processing**, *ACM Transactions on Graphics*, vol. 32, n° 4, article n° 80, 2013. Vidéo à voir : <http://people.csail.mit.edu/nwadhwa/phase-video/>

Hao-Yu Wu *et al.*, **Eulerian video magnification for revealing subtle changes in the world**, *ACM Transactions on Graphics*, vol. 31(4), article n° 65, 2012 (<http://people.csail.mit.edu/mrub/papers/vidmag.pdf>).

LES {Partagez les savoirs} RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

Détails sur mnhn.fr, rubrique : "Les rendez-vous du Muséum"



UN CHERCHEUR / UN LIVRE

Lundi 15 février - 18h
Guide des Hémiptères de France, Éditions Delachaux / Muséum, 2015
Avec R. Garrouste, entomologiste et écologue, Muséum

CONFÉRENCES / DÉBATS

La Nature nous parle : la sonothèque du Muséum

Lundi 22 février - 18h
Les grillons : complexité d'un système de communication simple
Avec T. Tobillard, maître de conférences, Muséum et L. Desutter, chargée de conservation, Muséum

Lundi 29 février - 18h
Symphonie sous-marine
Avec L. Di Lorio, bio-acousticienne, chaire CHORUS, Fondation Grenoble INP et É. Parmentier, professeur, Laboratoire de Morphologie fonctionnelle et Évolutive, Institut de Chimie de Liège

Autour de l'exposition *Sur la piste des grands singes*

UNE EXPO / DES DÉBATS

Lundi 8 février - 18h
Les grands singes : question de santé !
Animé par M.-O. Monchicourt, journaliste et avec A. Epelboin, médecin anthropologue, Muséum ; S. Masi, primatologue, Muséum et V. Narat, vétérinaire, Muséum

MÉTIER DU MUSÉUM

Dimanche 28 février - 15h
Taxidermiste des orangs-outans de l'exposition
Avec C. Voisin

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution — 36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e

