

L'ENSIC, l'ESPCI ParisTech,
Chimie ParisTech et l'ECPM
vous invitent au :

FORUM HORIZON CHIMIE

30^{ème} anniversaire !

Jeudi 4 février 2016
9h00 - 18h00

Une rencontre privilégiée avec une quarantaine d'entreprises et l'opportunité de postuler à des offres de stage et d'emploi dans des domaines allant de l'énergie à l'agro-alimentaire, en passant par la cosmétique, le secteur pharmaceutique, les sciences des matériaux et les biotechnologies.

Stands d'exposition, conférences, tables rondes, simulations d'entretiens d'embauche et corrections de CV seront mis en place afin de vous aider à approfondir votre projet professionnel et faciliter votre entrée dans le monde du travail.



> Entrée libre
Maison de la Chimie

28 bis rue Saint-Dominique
75 007 Paris
Métro Invalides

Pour plus de renseignements:
06 22 23 85 58
www.horizon-chimie.fr



Capter les mou

En amplifiant d'imperceptibles variations de couleurs d'une image à l'autre d'une séquence vidéo, on détecte des mouvements infimes. Avec des applications aussi bien en médecine qu'en ingénierie.

Les premiers microscopes, aux XVI^e et XVII^e siècles, ont transformé des lamelles de verre en apparence complètement transparentes en un univers grouillant de bactéries, de cellules, de grains de pollen et de cristaux complexes. Grâce à ces instruments, les scientifiques ont accédé à un monde invisible à l'œil nu.

À notre avis, un nouveau type de microscope est en passe de dévoiler un autre monde tout aussi nouveau et fascinant: un monde de mouvements et de variations de couleurs trop infimes pour être saisis par l'œil humain. Les pulsations sanguines qui parcourent un visage le rendent tour à tour plus rouge ou plus blanc, le vent peut

faire osciller très légèrement une grue de chantier, et la respiration d'un bébé est souvent si subtile qu'elle échappe à notre regard. Ces changements sont extrêmement petits, mais peuvent être importants. Ils révèlent notre état de santé ou des vibrations parasites d'une machine sur le point de tomber en panne. Avec nos collègues, nous avons développé un « microscope du mouvement », qui associe une caméra vidéo et un logiciel de traitement d'images approprié. Cet outil amplifie les mouvements qui animent des personnes ou des objets complètement immobiles en apparence.

Nous avons découvert notre microscope du mouvement par un heureux

hasard. Initialement, nous travaillions sur un projet visant à mesurer de minuscules changements de couleur, trop faibles pour être distingués à l'œil nu.

Notre objectif initial était d'utiliser une caméra vidéo pour mesurer le pouls d'une personne en détectant les minuscules variations de couleur dues à la circulation du sang dans son visage, rythmée par les battements du cœur. Le changement de couleur de chacun des pixels en réponse à la circulation sanguine est de seulement 0,2 % sur un cycle cardiaque. Or les capteurs des caméras ne détectent pas des valeurs exactes et ils enregistrent aussi du bruit aléatoire, dont l'amplitude est souvent



vêtements invisibles

Frédo Durand, William Freeman et Michael Rubinstein

supérieure à 0,2 %. Ce bruit masque donc les variations de rougeur.

En 2010, Rosalind Picard, Ming-Zher Poh et Daniel McDuff, du Media Lab du MIT (Institut de technologie du Massachusetts) avaient pu mesurer le pouls à partir des variations de couleur, mais nous avions l'intuition que leurs calculs, faisant intervenir des notions mathématiques élaborées, étaient plus compliqués que nécessaire.

Avec notre étudiant Hao-Yu Wu, John Guttag, du MIT, et Eugene Shih, alors à Quanta Research Cambridge, nous avons décidé de remplacer le nombre représentant la couleur de chaque pixel par une moyenne de tous les pixels voisins. Cette méthode réduit le bruit puisque ces fluctuations aléatoires ont tendance à se compenser mutuellement dans un groupe de pixels assez grand. Nous avons aussi éliminé les changements de couleur qui se produisaient plus rapidement ou plus lentement que les valeurs typiques du pouls chez l'adulte à l'état de repos.

Notre approche simple s'est révélée fructueuse pour convertir les changements de pixels en nombre de battements par minute. Mais ces changements de couleur étaient invisibles à nos yeux, et nous voulions voir à quoi ils ressemblaient. En amplifiant d'un facteur 100 les changements de rougeur, nous sommes parvenus à voir clairement le visage d'un homme adulte rougir à chaque battement de cœur.

Cette technique fonctionne aussi pour les bébés. Avec les médecins Donna Brezinski et Karen McAlmon, alors à l'hôpital de Winchester, dans le Massachusetts, nous avons filmé des nouveau-nés avec un appareil photo numérique classique. En utilisant notre technique d'amplification, nous avons mesuré le pouls sur la vidéo ; il correspondait parfaitement à celui mesuré par un cardiofréquencemètre attaché à un doigt du bébé. Une telle mesure du pouls, sans contact, pourrait être utile pour les nouveau-nés prématurés, si fragiles qu'il vaut mieux éviter de les toucher. Pour les adultes, ces visualisations permettront,

par exemple, de détecter des anomalies de la circulation sanguine susceptibles de traduire des problèmes de santé, tels que des asymétries de la circulation sanguine entre les côtés gauche et droit du corps.

Un monde toujours en mouvement

Nos vidéos nous ont confrontés à une énigme. Afin de simplifier le traitement des couleurs, nous avons demandé aux sujets adultes qui se tenaient devant nos caméras de se tenir immobiles, et leur tête semblait effectivement dénuée de mouvements dans les vidéos initiales. Mais quand nous avons regardé les résultats amplifiés, nous avons remarqué que les têtes bougeaient. Notre technique semblait accentuer non seulement

EN AMPLIFIANT LES VARIATIONS de couleurs du visage, le rougissement de la peau dû à la circulation sanguine devient visible. Cette technique permet de mesurer le pouls, mais aussi de révéler des mouvements infimes.

les changements de couleur, mais aussi les mouvements imperceptibles.

Dans des travaux antérieurs avec d'autres collègues, nous nous étions intéressés à l'amplification de mouvements infimes dans des vidéos. Nous avons utilisé des logiciels spécialisés qui modélisent et calculent le vecteur déplacement de chacun des pixels de l'image. Ce traitement était lourd et sujet à des erreurs. Nous étions maintenant stupéfaits : notre nouvelle approche parvenait à faire la même chose avec des calculs simples et sans recourir aux laborieux vecteurs du mouvement.

De la couleur au mouvement

Pourquoi les changements de couleur accentués grossissaient-ils aussi ces petits mouvements ? Pour le comprendre, nous avons étudié comment le mouvement dans une vidéo se traduit en termes de changements locaux de couleur. Imaginez une balle éclairée par la droite : le côté droit de la balle est lumineux et le côté gauche est sombre. Considérez un pixel donné sur l'écran : si la balle traverse l'écran de gauche à droite, le pixel représente d'abord un point éclairé de la balle, puis s'assombrit à mesure qu'il représente un point de plus en plus à gauche de la balle. La variation dépend de la vitesse de la balle et de la transition abrupte de luminosité entre les côtés gauche et droite de la balle, ce qu'on appelle le gradient de couleur. Mathématiquement, le changement de couleur d'un pixel par unité de temps est égal au produit de la vitesse de l'objet par le gradient de couleur.

Notre algorithme, bien sûr, ne connaît ni les gradients de couleur ni la vitesse des objets dans les vidéos. Toutefois, parce qu'il amplifie le changement de couleur en chaque point quand la balle se déplace d'une fraction de centimètre vers la droite, il amplifie aussi ce mouvement infime de la balle pour le rendre visible à vos yeux. De la même façon, les couleurs des pixels représentant des points particuliers de la poitrine d'un bébé changent à mesure que celui-ci respire, et en accentuant les changements de couleur, on rend beaucoup plus visible le très léger mouvement de la poitrine.

La différence entre nos précédents travaux portant sur les vecteurs déplacement et notre nouvelle approche fondée sur les variations temporelles de couleur est une question de perspective. En faisant une

■ LES AUTEURS



Frédo DURAND est professeur de génie électrique et d'informatique au MIT (Institut de technologie du Massachusetts). Il est spécialiste des techniques numériques de photographie.



William FREEMAN est professeur de génie électrique et d'informatique au MIT. Il étudie l'application de l'intelligence artificielle à la vision par ordinateur.



Michael RUBINSTEIN est chercheur chez Google ; il travaille sur la vision par ordinateur.

L'ESSENTIEL

■ **Même quand ils semblent à nos yeux parfaitement immobiles, les objets et les personnes sont animés de minuscules mouvements.**

■ **En amplifiant les changements de couleur des pixels d'une vidéo image après image, les chercheurs ont créé un « microscope du mouvement » qui rend ces transformations visibles.**

■ **Cet outil peut rendre de nombreux services : suivi du rythme cardiaque ou de la respiration, recherche de défauts de fonctionnement dans des machines, etc.**

analogie avec une rivière, la différence revient à suivre le mouvement de l'eau ou à rester immobile au milieu du courant. C'est ce changement de point de vue qui rend nos calculs beaucoup plus simples. En mécanique des fluides, les physiciens utilisent ces deux approches pour modéliser les écoulements : l'approche dite lagrangienne consiste à suivre une quantité donnée de fluide lors de son déplacement dans l'espace, comme un observateur sur un bateau suit le flot d'une rivière ; à l'inverse, l'approche dite eulérienne fixe un lieu de l'espace et étudie le fluide qui y passe, comme si l'observateur se tenait sur un pont.

Nous avons adopté le point de vue lagrangien dans nos premiers travaux, et nous étions comme des observateurs sur un bateau : les pixels sont suivis sur la vidéo et déplacés de point en point suivant des vecteurs amplifiés. En revanche, notre nouvelle approche considère le changement de couleur en un lieu fixe, comme lorsque l'observateur reste sur le pont. Cette perspective locale ne s'applique qu'à de petits mouvements, mais elle est beaucoup plus simple et robuste. À l'aide de cette technique, un ordinateur traite rapidement une vidéo, alors que nos travaux précédents nécessitaient un long temps de calcul, avec des erreurs fréquentes.

Amplification eulérienne

En 2012, dans un article traitant de cette méthode que nous nommons « amplification vidéo eulérienne », nous avons décrit plusieurs exemples d'utilisation, dont le changement de couleur d'un visage sous l'effet de la circulation sanguine, mais aussi l'observation des mouvements respiratoires d'un nourrisson, amplifiés de telle sorte que les parents d'un nouveau-né pourraient surveiller un signal vidéo accentué afin de vérifier que le bébé bouge.

Nous avons aussi pris une vidéo à grande vitesse d'une guitare dont toutes les cordes vibraient et nous avons sélectionné d'étroites bandes de fréquences autour de certaines notes pour isoler et amplifier une corde à la fois, par exemple l'intervalle entre 72 et 92 hertz pour la corde de mi grave vibrant à 82 hertz. Les autres cordes paraissaient absolument immobiles.

Nous avons créé un site Internet où les gens pouvaient télécharger leurs vidéos et appliquer notre outil d'amplification du mouvement (*pour des exemples, voir <https://lambda.grilab.com/site/>*). Les visiteurs

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.

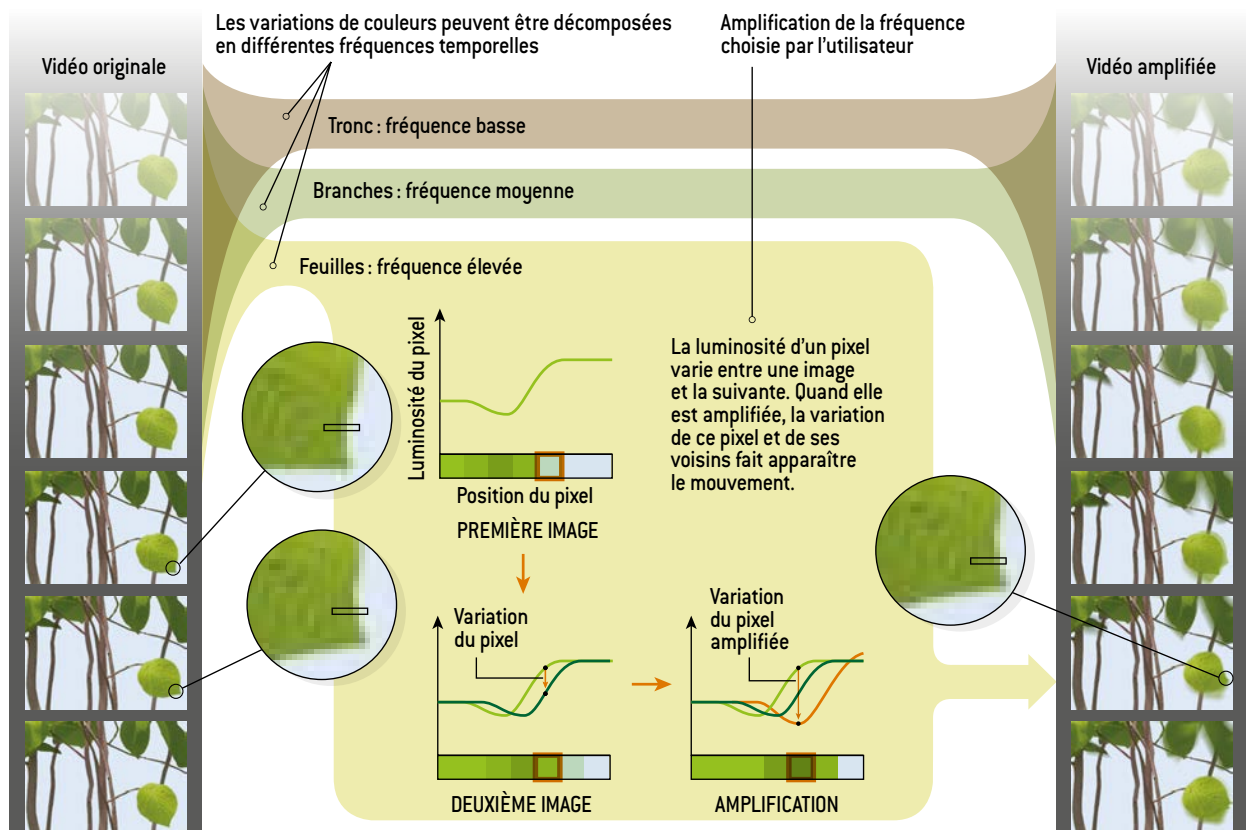
Ces résultats nous ont incités, avec notre étudiant en thèse Neal Wadhwa, à développer un nouvel algorithme qui préserve les bénéfices des approches eulériennes simples tout en donnant une meilleure vision quand les changements deviennent extrêmes.

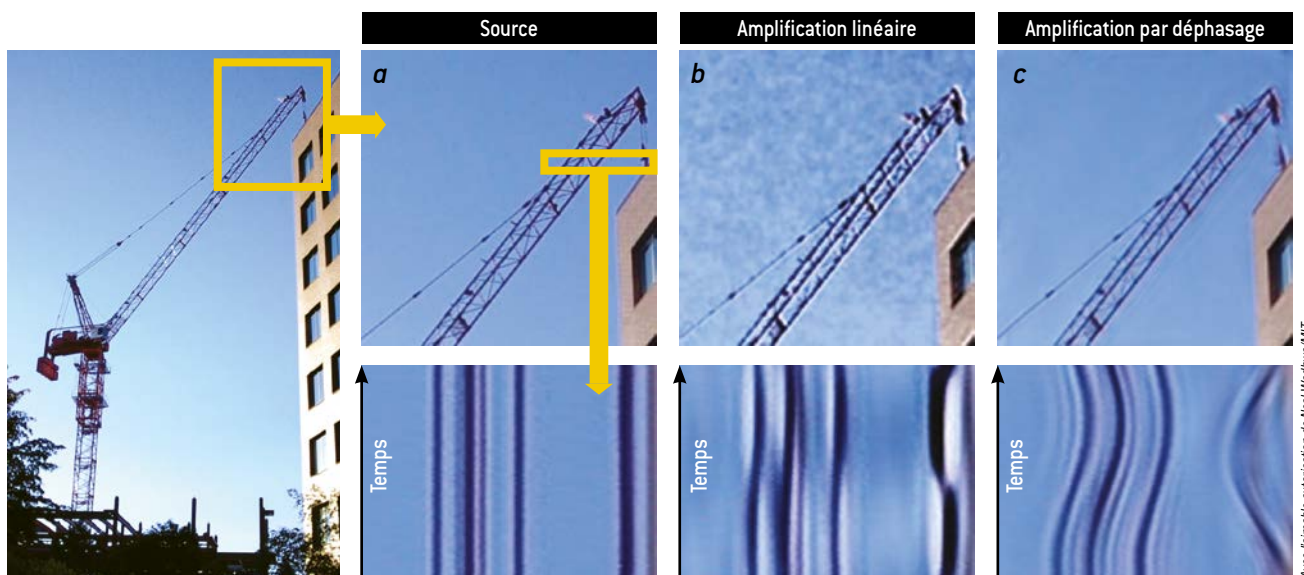
Nous nous sommes rendu compte que l'origine des limites de notre méthode initiale est qu'elle traite de la même façon les bords et les zones uniformes qui les entourent, alors que les bords correspondent à des différences de couleurs beaucoup plus grandes (des gradients plus importants). Ainsi, si vous 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"

POUR LA SCIENCE

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



Combattre la douleur chronique

Stephani Sutherland

Brûlures, élancements, douleurs sourdes... Quelle que soit sa forme, la douleur chronique défie les traitements. Mais de nouvelles découvertes sur ses causes ouvrent des pistes inédites pour enfin la juguler.

« **S**urtout va chez l'épicier, pas au Burger King », précise Jama Bond à son mari parti lui chercher des glaçons par une nuit de 2012, « leurs glaçons fondent trop vite ». Jama Bond, alors âgée de 38 ans et enceinte de presque neuf mois, a les pieds rouges, gonflés et douloureux. Pour calmer la douleur sans léser sa peau, elle enveloppe ses pieds de sacs-poubelles et les immerge dans de l'eau glacée. Quelques mois plus tôt, Jama Bond était une jeune femme en bonne santé, employée de bureau dans une société d'installation de panneaux solaires, menant une vie normale à Santa Rosa, en Californie. Mais depuis, se doucher est devenu pour elle une torture.

Jama Bond souffre d'une maladie nommée érythromélgie (du grec signifiant « douleur des membres rouges »), caractérisée par une forte sensation de brûlure aux mains ou aux pieds, lesquels deviennent extrêmement sensibles, même à une faible chaleur ou à une légère pression. Dans la plupart des cas, comme pour Jama Bond, la maladie survient sans raison (elle n'a pas de lien avec la

L'ESSENTIEL

- Les douleurs chroniques touchent plus de 20 % de la population mondiale.
- Les opiacés et les autres médicaments disponibles ne sont pas toujours efficaces pour soulager les personnes atteintes et présentent parfois des risques importants.
- Toutefois, les recherches sur les voies de signalisation spécifiques de la douleur ont révélé de nouvelles cibles prometteuses.
- Des substances extraites du venin d'animaux figurent parmi celles testées en tant qu'analgésiques.

© Sergey Nivens / Shutterstock.com

grossesse). L'érythromélgie est une maladie rare qui ne touche que treize personnes environ sur un million, mais la douleur chronique sous ses innombrables formes est fréquente et a souvent des origines mystérieuses.

On estime que cent millions de personnes aux États-Unis souffrent de douleurs chroniques, le plus souvent sous la forme de douleurs dorsales, de maux de tête ou d'arthrite. Au total, ces douleurs touchent plus d'Américains que le diabète, le cancer et les maladies cardiovasculaires réunis et coûtent plus cher : 635 milliards de dollars par an en soins médicaux et journées de travail perdues, d'après une analyse de 2012. La situation n'est pas meilleure en Europe (*voir les chiffres page 56*). Le coût en souffrance est incalculable. Les personnes atteintes de douleurs chroniques ont un risque plus élevé d'invalidité, de dépression, de troubles de l'humeur et du sommeil, de dépendance aux drogues ou à l'alcool et de suicide.

La douleur a une utilité : elle constitue un système d'alarme intégré contre les