

Diffusion vidéo : dépasser l’objectif d’efficacité et viser une sobriété choisie

Thomas MAUGEY^{1*}, Daniel MÉNARD^{2*}, Anne-Cécile ORGERIE^{1*}, Robin RICHARD^{1*}

¹Univ. Rennes, Inria, CNRS, IRISA, Rennes, France

²Univ. Rennes, INSA Rennes, CNRS, IETR - UMR 6164, Rennes, France

* Ordre alphabétique

thomas.maugey@inria.fr, daniel.menard@insa-rennes.fr, anne-cecile.orgerie@irisa.fr,
robin.richard@inria.fr

Résumé – Afin de diminuer l’impact écologique d’une technologie, les scientifiques s’orientent bien souvent vers des questions d’efficacité énergétique, mettant de côté le complexe effet rebond engendré. Dans cet article, nous étudions le cas de la diffusion vidéo, et nous discutons de l’urgente nécessité de pouvoir établir des limites. Nous montrons que celles-ci peuvent provoquer des oppositions ou des contournements, illustrant bien la difficulté de la tâche. Nous concluons enfin que cette question des limites, doit être considérée comme une problématique de recherche en tant que telle et que celle-ci est intrinsèquement pluridisciplinaire.

Abstract – To reduce the ecological impact of a technology, scientists often focus on energy efficiency issues, ignoring the complex rebound effect generated. In this article, we focus on the video transmission technology, and discuss the urgent need to be able to set limits. We show that these limits can provoke opposition or circumvention, illustrating the difficulty of the task. Finally, we conclude that the question of limits must be considered as a research problem in its own right, and that it is intrinsically multidisciplinary.

1 Introduction

L’urgence écologique n’est plus à démontrer. Les nécessaires politiques de sobriété pour y répondre doivent toucher *tous* les domaines, y compris le monde numérique, qui n’est, en effet, pas intangible. La sobriété numérique implique de répondre à deux grandes questions : (i) quels systèmes numériques voulons-nous et ne voulons-nous pas ? (ii) comment mettre des limites au déploiement de ceux que nous choisissons ? Dans cet article, nous nous penchons sur la question (ii) qui traite de la possibilité de déployer un système numérique de manière sobre.

La réponse des scientifiques à la question (ii) repose bien trop souvent sur l’objectif d’optimiser le système numérique en lui-même (en le rendant par exemple moins énergivore ou consommateur de ressources). Cette manière d’aborder la question n’est malheureusement pas à la hauteur de l’enjeu [15], car elle omet un élément crucial et bien connu depuis le 19^e siècle : l’effet rebond. En deux mots, l’effet rebond (ou paradoxe de Jevons [21]) stipule que l’optimisation d’une ressource consommée par un système technique conduit généralement à l’augmentation de son utilisation, et donc à une consommation globale de ressource qui s’accroît.

La sobriété ou frugalité d’un système numérique ne viendra que lorsque celui-ci aura des contours limités (par exemple par

des réglementations)¹. Or, imposer des limites peut aller à l’encontre de certains acteurs du numérique ou d’un modèle économique majoritairement usité. Ces limitations ne sont donc pas anodines et nécessitent de déployer une vision globale du domaine, pour laquelle l’expertise des scientifiques peut être bénéfique, ouvrant la voie à de nouveaux types de sujets de recherche.

Dans cet article, nous étudions le cas spécifique de la diffusion vidéo. En effet, les systèmes de diffusions vidéos sont aujourd’hui omniprésents (vidéo à la demande, appel vidéos, etc.) et représentent une grande part de l’empreinte environnementale du numérique. Nous étudions les efforts de recherche qui visent à l’optimiser ainsi que les probables effets rebond associés. Nous présentons ensuite des premières limitations qui ont été tentées, et les réactions qu’elles ont suscitées. Nous concluons enfin pour dessiner les différents enjeux posés par cette question de la sobriété dans les systèmes vidéos.

2 Impacts de la diffusion vidéo

D’un point de vue de l’impact environnemental de la diffusion vidéo, la consommation d’énergie est l’élément le plus étudié. Cette consommation d’énergie peut être étudiée de deux

^{*}Ce travail a été partiellement financé par l’ANR (MADARE, Project-ANR-21-CE48-0002)

1. On pourra se référer au rapport de l’AFNOR [6] qui donne des définitions de l’*efficacité* (“Aptitude à optimiser les moyens alloués pour atteindre un résultat défini”) à la *frugalité* (“Aptitude à se contenter d’un niveau de résultat jugé suffisant en redéfinissant les usages et les besoins”).

points de vue : le point de vue local, où les différents composants d'une chaîne de diffusion vidéo sont étudiés en détail, et le point de vue global, où l'objectif est de modéliser la consommation d'énergie de l'ensemble de la chaîne de diffusion. Une analyse de bout en bout de la chaîne de diffusion nécessite de prendre en compte la phase de génération du *train binaire* au sein de centres de données, la transmission à travers le réseau cœur et le réseau d'accès, ainsi que la réception sur le terminal utilisateur. Différents modèles ont été proposés par le *think thank* The Shift Project [5], le projet DImpact en collaboration avec le cabinet CarbonTrust [20], ou des laboratoires académiques [7, 8]. La consommation d'énergie, voire les émissions de gaz à effet de serre, ne représente qu'une part de l'impact environnemental. Cet impact peut être évalué au moyen de 16 indicateurs d'impact tel que proposé par la Commission Européenne dans le cadre de l'empreinte environnementale des produits (PEF).

Chandaria *et al* [3] ont été parmi les premiers à étudier les émissions de carbone liées à la diffusion de vidéos, en comparant l'empreinte carbone de la télévision linéaire et de la diffusion vidéo en continu pour la BBC. L'étude montre l'impact important du terminal TV. Cette étude a été mise à jour par Schien *et al* [18]. Dans [19], une Analyse de Cycle de Vie (ACV) simplifiée est réalisée pour comparer l'impact environnemental de l'expédition de DVD et de la diffusion vidéo en continu. L'analyse de sensibilité souligne l'importance de l'intensité énergétique du réseau. L'étude la plus aboutie est celle menée conjointement par l'ARCOM, l'ARCEP et l'ADEME et publiée en septembre 2024 [2]. Une ACV rigoureuse a été proposée pour différentes unités fonctionnelles de services de diffusion audio et vidéo. Cette étude montre la prédominance de l'impact du terminal utilisateur et plus particulièrement de sa phase de fabrication, l'importance du mix électrique et l'impact significatif des réseaux mobiles. Les différentes ACV concluent que l'impact environnemental est dominé par la fabrication et l'utilisation (consommation d'énergie).

Enfin, il convient de ne pas omettre le coût social et humain [14] de l'extraction des ressources, nécessaires à fabriquer nos outils numériques, et en particuliers les terminaux qui affichent les vidéos.

3 Optimisation et probables effets rebond

Ces dernières années, d'importants efforts de recherche ont été consacrés à l'optimisation de la chaîne de transmission des vidéos. Tout d'abord, comme l'impact de la diffusion vidéo est étroitement lié à la taille de celles-ci, l'évolution des standards vidéos (environ 50% de gain par décade) a permis de réduire le coût énergétique nécessaire à transmettre une vidéo (à quantité de pixels fixée). L'effort d'optimisation énergétique a également porté sur le processus complexe d'acheminement des vidéos du serveur origine jusqu'à l'affichage chez l'utilisateur. Originellement, tout était optimisé de manière à ce qu'à bande passante donnée, l'utilisateur ait la meilleure qualité visuelle possible. Aujourd'hui, des méthodes sont proposées pour prendre en compte les contraintes énergétiques que

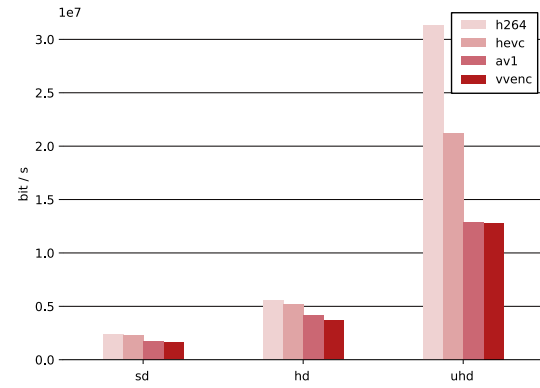


FIGURE 1 – Taille des vidéos compressées (au niveau de qualité à 40dB) par définition et en fonction des standards, pour un extrait de 19 s de la vidéo *Big Buck bunny*.

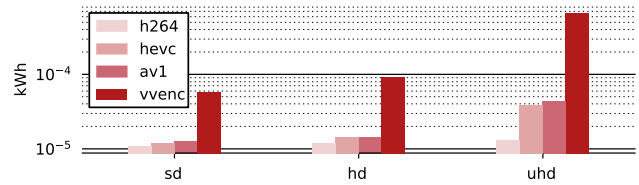


FIGURE 2 – Complexité d'encodage pour chacun des standards d'après les données de [1].

ce soit dans le codage, la transmission, le décodage ou l'affichage [9, 13].

Seulement, cette optimisation énergétique n'a pas eu comme effet de réduire l'impact global de la diffusion vidéo. Bien au contraire, celle-ci n'a pu qu'en faciliter l'accroissement, *cf* paradoxe de Jevons ou effet rebond [21]. Dans le cas de la vidéo, l'effet rebond n'a pas été formellement prouvé. En revanche, il est probable que la diminution de la taille des vidéos ait pu participer à l'accroissement du volume de données vidéo échangées. En effet, nous avons connu ces dernières années une explosion du trafic dû à la vidéo. Mais pas seulement, chaque nouveau standard est accompagné d'une mise sur le marché de solutions vidéos (contenus, diffusion, TVs) avec une définition plus grande (*i.e.*, un plus grand nombre de pixels), une fréquence d'affichage en augmentation, mesurée en trames par seconde (tps), ou un codage de la couleur plus précis.

Dans la Figure 1, nous montrons l'effet des différents standards de compression : H.264, HEVC, AV1, VVC (du plus ancien au plus récent) sur la taille d'une vidéo pour un même niveau de qualité et pour trois scénarios : SD (24 tps, couleurs codées sur 8 bits, définition 720x480), HD (25 tps, couleurs codées sur 8 bits, définition 1280x720), UHD (60 tps, couleurs codées sur 10 bits, définition 3840x2160 pixels). Nous voyons que, bien que plus efficaces, les nouveaux standards n'arrivent pas à compenser l'accroissement du nombre de pixels à transmettre entre deux niveaux de définition. Non seulement ces codecs modernes n'arrivent pas à contenir l'accroissement du volume des données d'entrée, mais en plus ceux-ci nécessitent une complexité d'encodage à chaque fois plus grande, comme

tracé dans la Figure 2. On voit que l'énergie nécessaire à encoder une vidéo s'accroît avec les codeurs les plus modernes, et cet accroissement est d'autant plus fort que la définition augmente. En résumé, de manière contemporaine à un accroissement des performances de compression, nous observons plus de vidéos, des vidéos de plus en plus volumineuses, et un encodage de plus en plus énergivore.

4 De nécessaires limitations

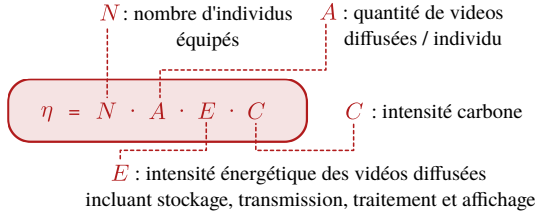


FIGURE 3 – Identité de Kaya pour l'impact carbone de la diffusion vidéo

Nous proposons dans cette section une comparaison des ordres de grandeur entre de potentiels gains en efficacité et l'accroissement de la quantité de vidéos diffusées. Pour cela, nous allons utiliser l'identité de Kaya [12], qui, bien que trop grossier pour être tout à fait juste, permet de dresser une vision globale de la situation et de son évolution dans le temps. Ce modèle fut utilisé par le GIEC dans son rapport de 2000 [17].

Dans cette identité de Kaya adapté au système technique de diffusion vidéo [16], nous écrivons que la quantité de gaz à effet de serre émis par la diffusion vidéo à une année n est donnée par :

$$\eta(n) = N(n) \cdot A(n) \cdot E(n) \cdot C(n), \quad (1)$$

où chacun des termes est expliqué dans la Figure 3. Afin de suivre l'évolution de $\eta(n)$ au fil des années, on suppose que chacun des termes de l'équation ci-dessus, suit une évolution exponentielle, i.e., $X(n) = \alpha_X X(n-1)$, où les α_X correspondent aux taux de croissance annuel moyen pour chacun des termes. L'intérêt de ce modèle est d'explicitier le levier sur lequel les scientifiques peuvent agir lorsque le système est rendu "plus efficace", à savoir α_E . L'accroissement du volume de vidéos (partiellement engendré par un probable effet rebond) est, quant à lui, symbolisé par les grandeurs α_N et α_A .

Pour la simulation, nous prendrons le chiffre de $\alpha_E = 0,9$ qui correspond à l'évolution des performances de codage (cf Section 3). Nous prendrons également les chiffres suivants : $\alpha_N = 1,06$ [4] et $\alpha_A = 1,24$ [11], $\alpha_C = 0,99$ [10]. L'évolution de $\eta(n)$ jusqu'à 2030 est tracée dans la Figure 4.

On voit bien que, malgré des efforts pour l'efficacité énergétique à la hauteur des accords de Paris, la quantité de vidéos diffusées grandit avec une telle ampleur que l'impact global de la diffusion vidéo ne peut qu'exploser. La solution est claire, afin de mettre en oeuvre une politique de sobriété, il s'agit d'influer également sur α_N et surtout sur α_A . Cela passe, entre autres, par des régulations et réglementations, comme nous le discutons dans la section suivante.

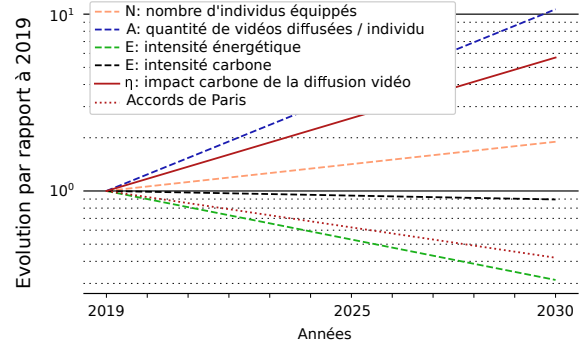


FIGURE 4 – Modèle de Kaya pour l'impact carbone de la diffusion vidéo avec $\alpha_N = 1,06$, $\alpha_A = 1,24$, $\alpha_E = 0,9$, $\alpha_C = 0,996$

5 Des limitations et des conséquences

Limiter l'expansion de la quantité de vidéos diffusées A n'a, pour l'heure, pas été traité de manière explicite et globale. En revanche, certaines initiatives ont été lancées afin d'influer sur une partie du problème. Par exemple, une guide de bonnes pratiques a été publié en Mai 2024 donnant par exemple des préconisations pour limiter l'impact de la diffusion vidéo². L'initiative récente la plus marquante est celle portée par l'Union Européenne en 2019, qui vise à stopper l'augmentation de la définition des écrans (et notamment des Télévisions). Plus exactement, la *Commission Regulation (EU) 2019/2021*³ du 1er Octobre 2019, fixe des limites à respecter pour l'indice d'efficacité énergétique (IEE) pour différentes définitions d'écran. Ces limites sont présentées dans le Tableau 1, où l'IEE est défini comme :

$$IEE = \frac{P_{\text{mesurée}} + 1}{(3[90 \tanh(0,02 + 0,004(A - 11)) + 4] + 3) + 3} \quad (2)$$

où $P_{\text{mesurée}}$ est la puissance mesurée en mode marche (en W) et A correspond à la surface de l'écran (dm^2).

TABLE 1 – Limites de l'IEE fixée par l'Union Européenne

	EEI _{max} pour les définitions ≤ à 2 138 400 pixels (haute définition)	EEI _{max} pour les définitions > à 2 138 400 pixels (haute définition) et ≤ à 8 294 400 pixels (UHD-4k)	EEI _{max} pour les définitions > 8 294 400 pixels (UHD-4k) et pour les dispositifs d'affichage à micro-LED
March 21	0,9	1,1	n/a
March 23	0,75	0,9	0,9

On peut voir que les limites fixées à partir de Mars 2023 sont très contraignantes. En effet, pour une taille d'écran fixée, la puissance consommée par une TV 8K (7680 × 4320 pixels) doit être la même que celle d'une TV 4K (3840 × 2160 pixels), ce qui est quasiment impossible à réaliser. Autrement dit, par

2. https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/referentiel_general_ecoconception_des_services_numeriques_version_2024.pdf

3. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/2021/oj/eng>

cette régulation, l'Union Européenne vise à empêcher la commercialisation des TV 8K et donc l'expansion de la définition des écrans. Vu qu'une TV 8K comporte 4 fois plus de pixels qu'une TV 4K, cela permettrait de significativement contenir le terme A dans l'équation (1).

Il est néanmoins intéressant de constater que ces limitations ne sont pas arrivées sans leurs lots de protestations des milieux industriels. L'exemple le plus parlant est celui de la *8K association*⁴. Celle-ci regroupe des industriels du secteur et s'affiche clairement comme une association qui a pour but "*d'éduquer, de promouvoir et d'évangéliser sur les nombreux aspects de l'écosystème 8K*". Dans un de leur article de blog datant de Septembre 2022⁵, cette association appelle clairement à faire pression auprès des députés : "*si vous pensez que ce règlement aura un impact sur votre activité et/ou sur l'accès de vos clients à vos produits ou services liés à la 8K, vous devez contacter les autorités de régulation de l'UE pour exprimer votre point de vue (lien)*". Une limitation n'est donc pas neutre ou indolore et vient légiférer à un endroit où il y a des divergences d'intérêts. On ne peut que constater que l'implication des citoyennes et citoyens est inexistante dans ce débat entre régulateurs et entreprises.

Un autre fait à souligner est que cette réglementation n'a pas réussi à obtenir l'effet escompté, car des TV 8K sont bel et bien sur le marché depuis 2023. Pour cela, les constructeurs ont détourné la réglementation en mettant leur TV 8K avec un mode "économie d'énergie" par défaut qui est compatible avec l'IEE (qui, selon la réglementation doit être mesuré "à la sortie du carton"). L'utilisateur a ensuite la liberté de changer le mode et de revenir à une configuration normale (et consommatrice)⁶.

En conclusion, on peut affirmer que fixer des limites n'est pas complètement utopique et est déjà expérimenté par les pouvoirs publics. En revanche, on voit aussi que c'est une tâche complexe qui entraîne des protestations ainsi que des contournements. Il s'agit là de penser la question des limites comme un sujet de recherche à part entière.

6 Conclusion

Comment poser des limites à un système technologique ? Il semble urgent de pouvoir répondre à cette question et de ne pas se cacher derrière la simple optimisation de ce système. On a vu que pour le cas de la vidéo, cette question est complexe et entraîne de nombreuses réactions, ce qui est attendu. Les scientifiques doivent donc se saisir de cette question comme un problème de recherche à part entière. Et cette question est par essence pluridisciplinaire. Voici, sans exhaustivité, quelques facettes du problème :

◇ **Droit** : comment établir une législation juste, équitable et qui soit efficace ? A quel niveau de juridiction intervenir ?

◇ **Sociologie** : comment réagissent les utilisateurs à des limites ? Quels en sont les effets positifs/négatifs adjacents ?

◇ **Epistémologie** : comment impliquer les citoyennes et citoyens dans le processus de décision et dans la construction d'un nouveau mode de diffusion vidéo sobre ?

◇ **Economie** : quels modèles économiques pour les entreprises dans un monde avec limites ?

◇ **Traitement du signal et des images** : où établir des limites afin d'atteindre la sobriété visée ? Comment développer une solution de diffusion sobre et ne misant pas sur une augmentation des flux ?

Ces questions devraient représenter un défi stimulant et fédérateur pour la communauté scientifique.

Références

- [1] H. Amirpour, M. Ghasempour, F. Tashtarian, S. Afzal, W. Hamidouche, and C. Timmerer. MVCD : Multi-Dimensional Video Compression Dataset. 2024.
- [2] ARCOM, Arcep, ADEME, and ICARE&CONSULT. Etude de l'impact environnemental des usages audiovisuels en France. *ADEME Whitepaper*, pages 1–353, 2024.
- [3] Jigna Chandaria, Jeff Hunter, and Adrian Williams. A comparison of the carbon footprint of digital terrestrial television with video-on-demand. *BBC Research Whitepaper*, 189, 2011.
- [4] U Cisco. Cisco annual internet report (2018–2023) white paper. *Cisco : San Jose, CA, USA*, 10(1) :1–35, 2020.
- [5] Maxime Efoui-Hess et al. Climate crisis : The unsustainable use of online video. *The Shift Project : Paris, France*, 2019.
- [6] Association française de normalisation (AFNOR). Référentiel général pour l'ia frugale-mesurer et réduire l'impact environnemental de l'IA. Technical report, AFNOR SPEC 2314, 2024.
- [7] Gaël Guennebaud, Aurélie Bugeau, and Antoine Dudouit. Assessing VoD pressure on network power consumption. *arXiv preprint arXiv :2304.03151*, 2023.
- [8] Christian Herglotz, Angeliki Katsenou, Xinyi Wang, Matthias Kränzler, and Daniel Schien. Foundations of measuring power and energy consumption in video communication. *IEEE Access*, 2025.
- [9] Christian Herglotz, Daniel Palomino, Olivier Le Meur, and C.-C. Jay Kuo. Editorial on circuits and systems for green video communications. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 15(1) :1–3, 2025.
- [10] International Energy Agency (IEA). Co2 emissions in 2022. 2022.
- [11] P Jonsson, S Carson, S Davis, et al. Ericsson mobility report (2021). *Ericsson, Stockholm, Sweden*, 2021.
- [12] Yoichi Kaya, Keiichi Yokobori, et al. *Environment, energy, and economy : strategies for sustainability*. United Nations University Press Tokyo (1997), 1997.
- [13] Olivier Le Meur, Claire-Hélène Demarty, Erik Reinhard, Franck Aumont, and Laurent Blondé. Energy-aware images : Quality of experience vs energy reduction. 2023.
- [14] Fabien Lebrun. *Barbarie numérique : l'exploitation criminelle des métaux technologiques au Congo (RDC)*. PhD thesis, Bordeaux 3, 2023.
- [15] Laura U Marks and Radek Przedpelski. The carbon footprint of streaming media : Problems, calculations, solutions. In *Film and television production in the Age of climate crisis : towards a greener screen*, pages 207–234. Springer, 2022.
- [16] Thomas Maugey. Towards digital sobriety : why improving the energy efficiency of video streaming is not enough. In *2023 IEEE 25th International Workshop on Multimedia Signal Processing (MMSP)*, pages 1–4. IEEE, 2023.
- [17] Nebojsa Nakicenovic, Joseph Alcamo, Gerald Davis, B de Vries, Joergen Fenhann, Stuart Gaffin, Kenneth Gregory, Arnulf Grubler, Tae Yong Jung, Tom Kram, et al. Special report on emissions scenarios. 2000.
- [18] Daniel Schien, Chris Preist, and Jigna Chandaria. Estimating the carbon footprint of watching video from the BBC. In *International Conference on Environmental Informatics (EnviroInfo) / International Conference on Information and Communication Technology for Sustainability (ICT4S)*. University of Copenhagen, 2015.
- [19] Arman Shehaby, Ben Walker, and Eric Masanet. The energy and greenhouse-gas implications of internet video streaming in the united states. *Environmental Research Letters*, 9(5) :054007, 2014.
- [20] Andie Stephens, Chloe Tremlett-Williams, Liam Fitzpatrick, Luca Acerini, Matt Anderson, and Noor Crabbendam. Carbon impact of video streaming. 2021.
- [21] Richard York and Julius Alexander McGee. Understanding the jevons paradox. *Environmental Sociology*, 2(1) :77–87, 2016.

4. <https://8kassociation.com>

5. "8K Industry Faces Challenge with New EU Regulatory Ruling", <https://8kassociation.com>, Sep. 19, 2022

6. "Samsung Has Found A Solution To Its 8K TV Power Problems. Here's How It Works", *Forbes*, Feb 27, 2023.