

1. Introduction

La transition énergétique en cours est très souvent considérée comme *le simple remplacement des combustibles carbonés par des alternatives non carbonées*. Une abondante littérature dont ce bulletin s'est fait l'écho dans plusieurs de ses numéros¹², montre que cette simplicité n'est qu'apparente. Selon un des articles cités par l'un de ces numéros, « *l'objectif de la nouvelle transition n'est pas uniquement d'introduire de nouvelles sources d'énergie, mais de repenser entièrement le socle énergétique d'une économie mondiale qui pèse aujourd'hui 100 000 milliards de dollars...* ». (DY, 2022).

Courant septembre 2021, Nick Eyre a publié un article³ intitulé *From using heat to using work: reconceptualising the zero carbon energy transition*, qui s'inscrit parfaitement dans cette dynamique de révision du socle énergétique de l'économie mondiale.

Dans cet article, Nick Eyre affirme que la transition énergétique en cours, fondée sur l'électricité et les sources renouvelables d'électricité (hydro, solaire et éolien), « *sera plus qu'un abandon des combustibles carbonés* ». Il propose de la penser avant tout comme un passage, **le passage i) des sources d'énergie productrices de chaleur**, à ii) **des sources d'énergie productrices de travail**.

Les conséquences opérationnelles de ce changement de perspective novateur sont majeures. Leur analyse montre que des améliorations considérables d'efficacité, notamment dans les processus de conversion de l'énergie primaire en énergie finale, sont possibles dans notre système énergétique. « *Une réduction de la demande d'énergie finale allant jusqu'à 40 % est probable grâce à ce seul effet* », indique Nick Eyre.

Dans un article récent⁴ inspiré de celui de Nick Eyre, Daan Walter et ses collègues parlent, à propos de ces conséquences, « *d'un bond massif de la productivité énergétique, une performance qui ne se produit qu'une fois par siècle, comparable au boom de l'après-Seconde Guerre mondiale, lorsque le pétrole et le gaz ont supplanté le charbon et la biomasse* »

Ce numéro du bulletin donne un aperçu des idées forces qui fondent cette nouvelle approche de la transition énergétique, une approche qui crédibilise davantage et conforte l'idée d'un monde décarboné grâce à l'électricité et aux sources renouvelables d'électricité.

¹ GSI, *Pour la transition énergétique en cours, des réalités incontournables*, mars 2023, <https://www.globalshift.ca/pour-la-transition-energetique-en-cours/>

² GSI, Bulletin, <https://www.globalshift.ca/bulletins/>, les numéros de novembre et décembre 2024, de mars et avril 2024, août et septembre 2023

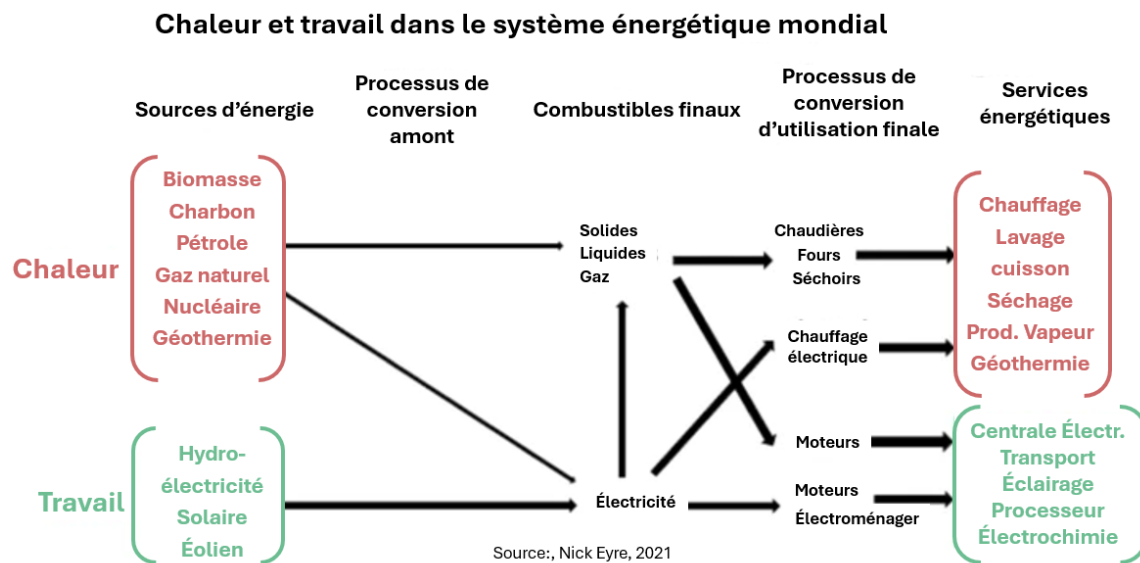
³ Nick Eyre, *From using heat to using work: reconceptualising the zero carbon energy transition*, September 2021, <https://link.springer.com/article/10.1007/s12053-021-09982-9#App1>

⁴ Daan Walter and all, *Energy after Fire, The Shift from Primitive Heat to Modern Work*, September 2024, <https://electrotechrevolution.substack.com/p/energy-after-fire>

2. Chaleur et travail se complètent dans le système énergétique mondial

Le schéma ci-dessous, tiré des travaux de Nick Eyre, montre que tant les services énergétiques que les sources d'énergie se présentent sous forme de chaleur et de travail.

« Toute **notre demande d'énergie**, indique Daan Walter, se résume soit à chauffer des choses, soit à les faire bouger (en termes de physique, à faire du travail) ». Chauffer de l'eau ou un appartement, cuire des aliments, sécher les cheveux ou produire de l'acier exigent de la chaleur à différentes températures. Mais pour couper, broyer, déplacer une voiture, ou plus subtilement mettre des électrons en mouvement dans un processeur ou un centre de données, il faut l'autre forme d'énergie, le travail.



Du côté de l'offre d'énergie, la plupart des sources d'énergie en usage, la biomasse, les combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) ou le nucléaire, libèrent l'énergie chimique ou nucléaire qu'elles stockent, sous forme de chaleur. Une autre catégorie de sources d'énergie, l'hydroélectricité, le solaire photovoltaïque et l'éolien, « libèrent, elles, leur énergie en faisant bouger les choses plutôt qu'en libérant de la chaleur ». Elles mettent en mouvement des électrons à l'origine d'un champ électromagnétique qui peut être utilisé pour fournir du travail permettant de faire tourner un moteur ou pour contrôler des électrons dans des automatismes, des processeurs ou des centres de données.

Dans ces différents cas, des **systèmes de conversion** appropriés (machines à vapeur, turboréacteur, brûleur, appareils électroménagers, moteur électrique) permettent de passer de la chaleur au travail ou du travail à la chaleur.

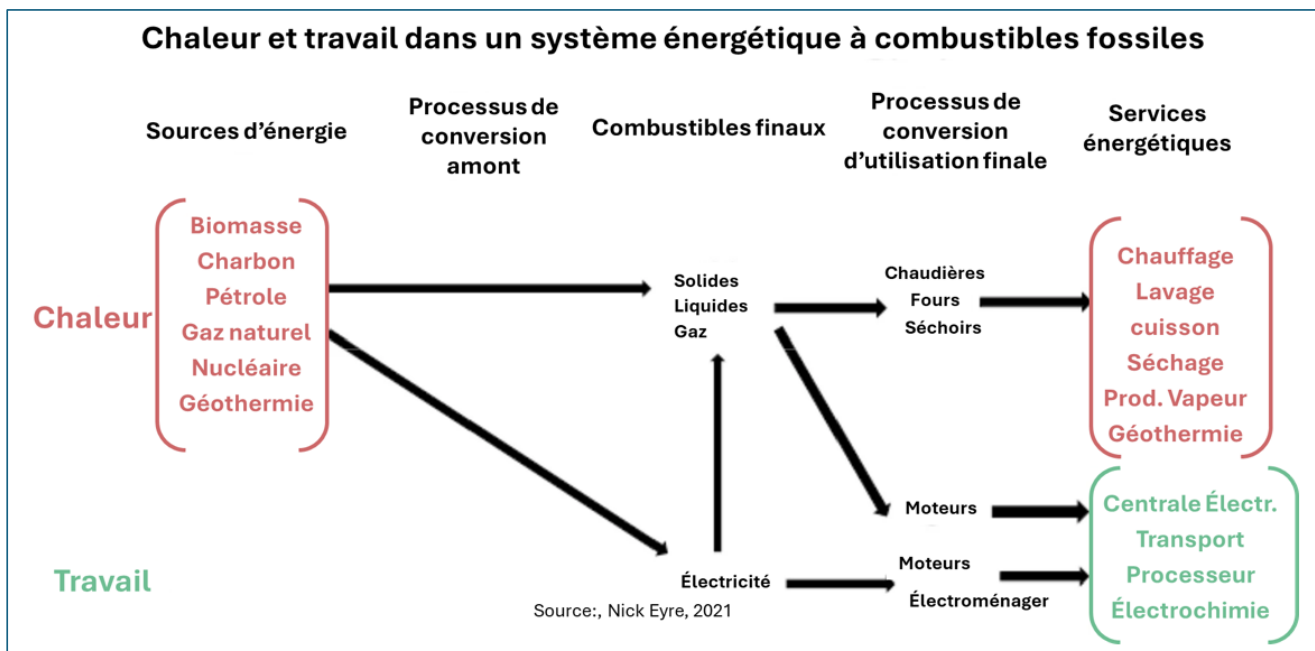
3. Tout en chaleur

Avant la maîtrise du feu, les seules sources d'énergie qu'utilisaient les humains étaient les aliments qu'ils ingéraient et qui fournissaient l'énergie (chaleur et travail) dont ils avaient besoin pour maintenir leur métabolisme, notamment la température corporelle, et pour mastiquer, se déplacer ou chasser (travail).

Avec le feu maîtrisé, la biomasse, une source d'énergie productrice de chaleur, s'impose comme fournisseur de services énergétiques nouveaux (cuisson des aliments, chauffage, éclairage, sécurité puis... métallurgie). Le travail est resté tributaire du moteur humain. La domestication des animaux et leur harnachement vont permettre de l'accroître, et de produire de nouveaux services énergétiques (travaux agricoles, traction, transport de charges plus lourdes et sur de plus longues distances...). Les moulins à eau et à vent, maîtrisés entre temps, décuplent les volumes des énergies productrices de travail, tout en permettant d'introduire à grande échelle de nouveaux services énergétiques (minoterie, textile...)

L'invention de la **machine à vapeur** permettant de **transformer la chaleur en travail** viendra bouleverser tous les équilibres antérieurs. Les améliorations successives de cette machine en feront rapidement la principale source de travail dans les usines ainsi que dans le transport terrestre, ferroviaire et maritime. La biomasse puis le charbon minéral étaient les principales sources d'énergie mobilisées. L'entrée en scène du pétrole comme combustible permettra la mise au point de nouveaux types de convertisseurs de chaleur en travail, les moteurs à combustion interne, les réacteurs et le turboréacteurs. La baisse soutenue du rapport poids/puissance qu'ont permise ces nouvelles machines thermiques a ouvert la porte à de nouveaux services énergétiques, notamment dans l'agriculture (tracteurs) et le transport (voitures personnelles et voyages en avion). On ira de plus en plus vite et on finira par maîtriser le vol à vitesses hypersoniques. La transformation de la chaleur en électricité grâce aux alternateurs va finir par asseoir le règne de la chaleur et des énergies productrices de chaleur (biomasse, charbon, pétrole, gaz naturel, nucléaire), et donc d'un système énergétique mondial qui en dépend presque totalement.

C'est ce qu'illustre le schéma ci-dessous (N. Eyre, 2021) représentant un système énergétique dans lequel tant les besoins de chaleur que de travail sont satisfaits à partir des seules sources productrices de chaleur.



4. Des pertes massives d'énergie dans les conversions

Un tel système énergétique se caractérise par des pertes massives d'énergie lors des conversions permettant de passer des sources d'énergie aux services énergétiques.

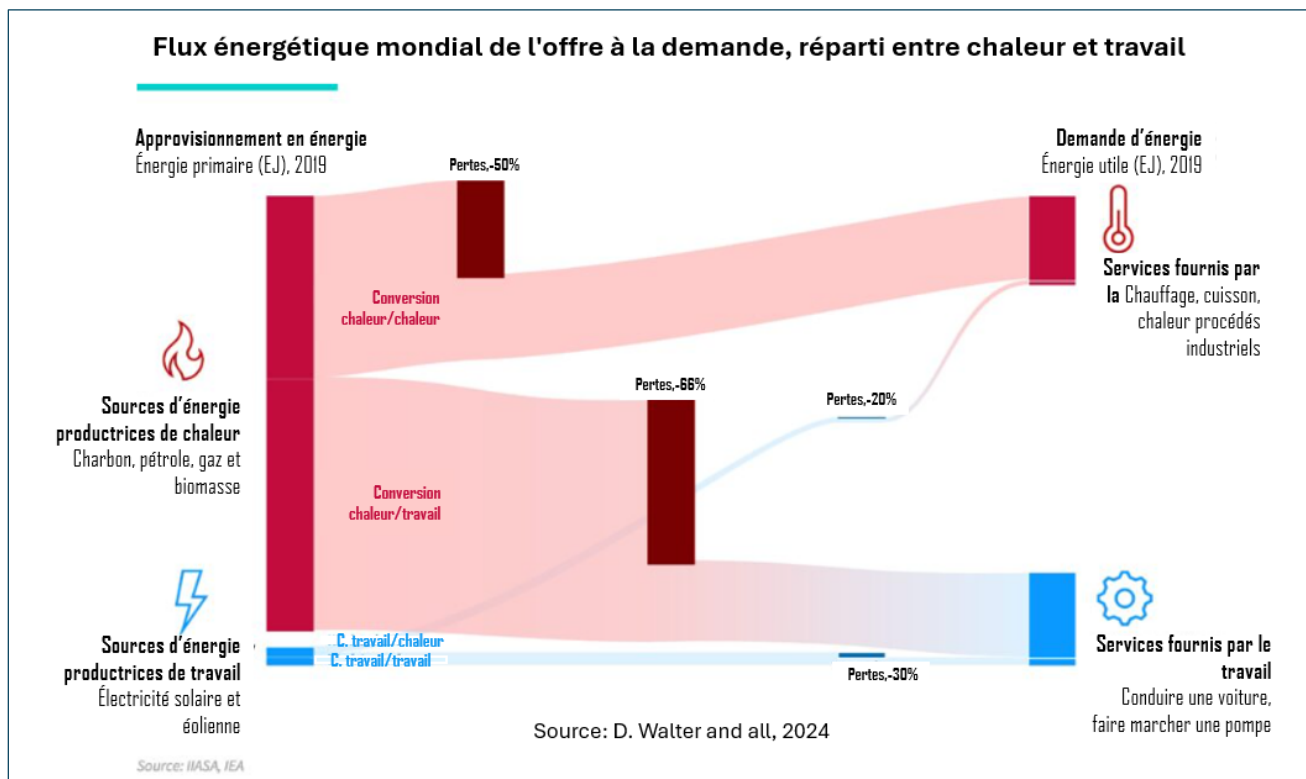
Le rendement maximal pour transformer la chaleur en travail ne peut dépasser 33%, selon la seconde loi de la thermodynamique. Il serait de l'ordre de 30% quand on brûle du mazout pour mettre une voiture en mouvement ou du charbon pour pomper de l'eau. De façon générale, « *Cela entraîne des pertes d'énergie massives de plus de 200 EJ par an, représentant près de 60 % de l'ensemble des déchets énergétiques mondiaux.* » (D. Walter, 2024).

Brûler du gaz pour éclairer une pièce crée plus de chaleur que de lumière. Brûler du charbon pour créer de l'électricité crée plus de chaleur que d'électricité. Brûler de l'essence pour déplacer un véhicule crée plus de chaleur que de mouvement. Nous envoyons plus d'énergie par les cheminées et les pots d'échappement que nous n'en mettons au travail pour alimenter notre économie.

D. Walter, 2024

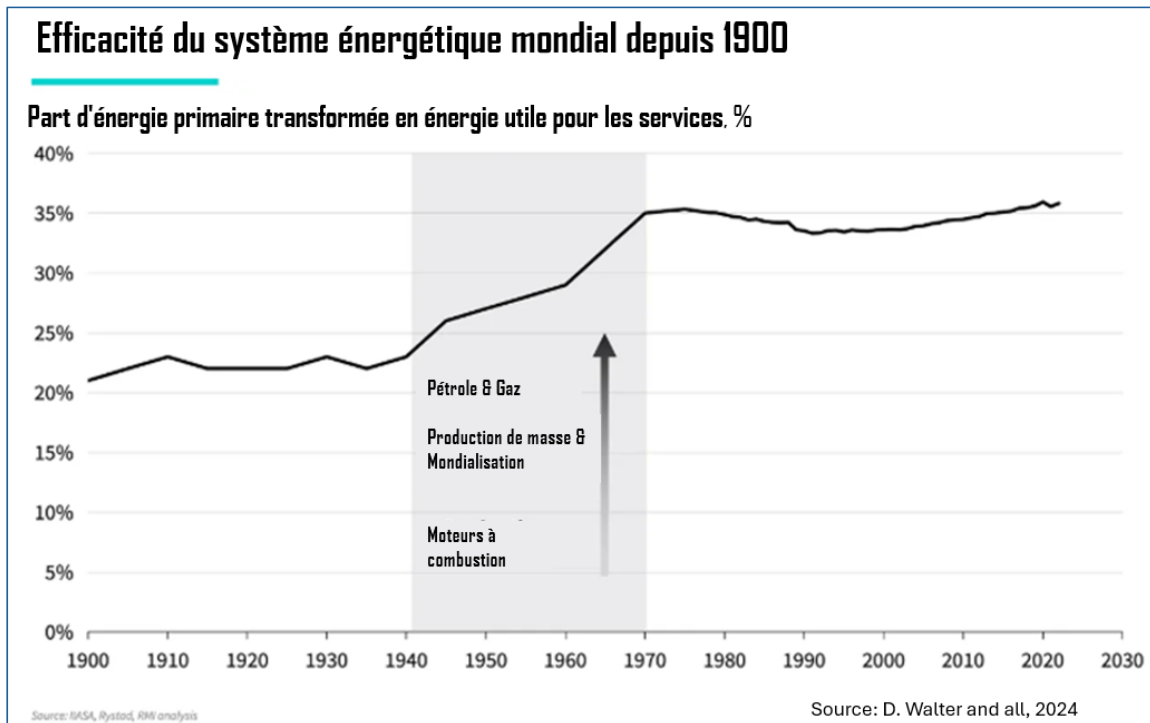
Les rendements seraient cependant relativement meilleurs, de l'ordre de 50% aujourd'hui, pour passer des sources productrices de chaleur à des services énergétiques utilisant la chaleur (D. Walter, 2024).

Le schéma ci-dessous, tiré de l'article de Daan Walter et coll. (D. Walter, 2024), représente les flux mondiaux d'énergie entre l'offre et la demande en 2019. Il donne une excellente idée des pertes de conversion entre les sources d'énergie et les services énergétiques.



On notera sur ce schéma, les relativement faibles niveaux des pertes (-20% et -30%), et donc les bons rendements (80% et 70%) dans les processus de conversion du travail en chaleur et du travail en travail.

Dans l'ensemble cependant, et malgré les progrès réalisés au cours des années 70 dans les rendements de conversion de la chaleur en travail, notamment avec la cogénération, la moyenne mondiale ne dépasse pas 35% ainsi que le montre le graphique ci-dessous tiré de l'article de Daan Walter et Coll.



L'inadéquation croissante entre les sources d'énergie mobilisées et les services énergétiques dont le monde a besoin serait la principale explication. « *Il y a un peu plus d'un siècle, la grande majorité de nos besoins en services énergétiques concernaient le chauffage qui représentait près de 90% de la demande d'énergie utile* » (D. Walter, 2024). Les énergies productrices de chaleur (biomasse, charbon) faisaient parfaitement l'affaire. Aujourd'hui, une part importante des services énergétiques dont nous avons besoin, la majorité (D. Walter, 2024), sert à produire du travail (mobilité, électronique, processeurs...), comme déjà indiqué. C'est cependant, pour une grande part (95%), avec les énergies productrices de chaleur (biomasse, charbon, pétrole, gaz et nucléaire) que ces services énergétiques producteurs de travail sont fournis. Tant que subsistera cette inadéquation les rendements énergétiques continueraient à stagner.

5. Et si l'on corrigeait cette inadéquation?

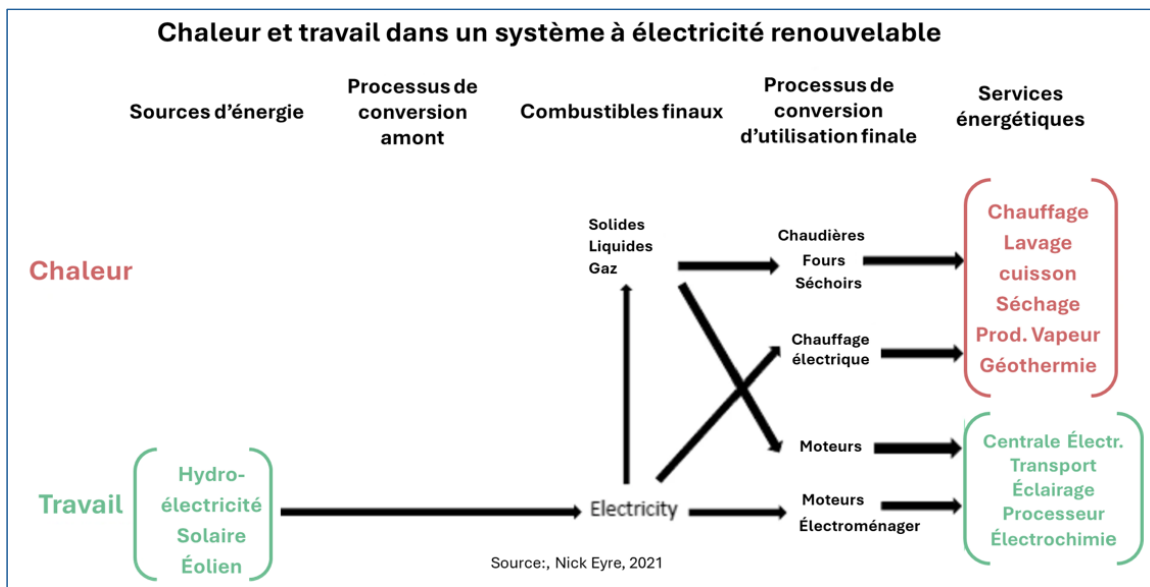
Nick Eyre considère que la transition en cours, fondée sur l'électricité et sur les sources renouvelables d'Électricité, l'hydroélectricité, le solaire photovoltaïque et l'éolien, s'inscrit pleinement dans la perspective de ces corrections. Ces énergies, productrices de travail, permettraient de réaliser la nécessaire adéquation entre sources d'énergie productrices de

travail et services énergétiques ne pouvant être produits que par du travail, avec des gains substantiels de rendement énergétique.

Comme hypothèses de travail pour les simulations qu'il faites pour son étude, il divise les services énergétiques en trois catégories :

- ✓ **Les services énergétiques délivrés par le travail et qui peuvent être électrifiés** (appareils électroménagers, mobilité, transports...). Les dispositifs électroniques ou d'éclairage modernes qui nécessitent les déplacements des électrons (lampes à incandescence, LED, lampes fluocompactes, processeurs, ...) sont classés ici.
- ✓ **Les services énergétiques fournis par la chaleur et qui peuvent être électrifiés** (processus industriels à basse température, chauffage des locaux, cuisson des aliments...). Les pompes à chaleur sont privilégiées pour le chauffage des locaux et la production de chaleur à basse température.
- ✓ **Les services énergétiques qui ne peuvent pas être électrifiés en pratique** (procédés industriels à haute température, véhicules lourds, aviation, transport maritime, ...). Pour ces services, le fuel privilégié est l'hydrogène vert, produit à partir des renouvelables. On s'appuierait sur les piles à combustibles dans le domaine du transport.

Le schéma ci-dessous tiré de l'article de Nick Eyre illustre ce système énergétique entièrement fondé sur les énergies renouvelables, des énergies productrices de travail.



Dans ce système, **les processus de conversion chaleur/travail** aux rendements limités (33% dans la plupart des cas, hors cogénération), **sont exclus**. Les moteurs à combustion interne sont remplacés par les moteurs électriques partout où cela est possible. La cuisson est assurée à 100% par l'électricité avec des rendements de 80% contre par exemple 6 % pour **les combustibles traditionnels** qui **seraient abandonnés**. Nick Eyre propose dans l'annexe 4 de son article une série d'hypothèses de conversion. Le tableau ci-dessous donne les facteurs de conversion retenus

Facteurs de conversion entre la consommation actuelle et future de carburant et d'électricité

Sector and process	Pre-transition energy	Fuel	Electricity
Industry			
High-temperature process	Fuels	67.0%	13.2%
	Electricity	0.0%	100.0%
Low-temperature process	Fuels	0.0%	80.0%
	Electricity	0.0%	100.0%
Drying and separation	Fuels	0.0%	33.3%
	Electricity	0.0%	41.7%
Motors, drives, lighting	Fuels	0.0%	100.0%
	Electricity	0.0%	100.0%
Space heating	Fuels	5.3%	23.2%
	Electricity	0.0%	32.3%
Other	Fuels	0.0%	80.0%
	Electricity	0.0%	100.0%
Buildings			
Space heating	Fuels	5.3%	23.2%
	Electricity	0.0%	32.3%
	Traditional biomass	0.0%	25.8%
Water heating	Fuels	0.0%	36.4%
	Electricity	0.0%	45.5%
	Traditional biomass	0.0%	36.4%
Cooking	Fuels	0.0%	62.5%
	Electricity	0.0%	100.0%
	Traditional biomass	0.0%	7.5%
Lighting, cooling and appliances	Fuels	0.0%	100.0%
	Electricity	0.0%	100.0%
	Traditional biomass	0.0%	100.0%

Sector and process	Pre-transition energy	Fuel	Electricity
Transport			
Vans	Fuels	0.0%	23.3%
	Electricity	0.0%	100.0%
Heavy goods vehicles	Fuels	30.1%	26.6%
	Electricity	0.0%	100.0%
Cars	Fuels	0.0%	23.3%
	Electricity	0.0%	100.0%
Bus	Fuels	15.3%	36.6%
	Electricity	0.0%	100.0%
Motor cycles	Fuels	0.0%	23.3%
	Electricity	0.0%	100.0%
Rail freight	Fuels	0.0%	40.0%
	Electricity	0.0%	100.0%
Rail passenger	Fuels	0.0%	45.0%
	Electricity	0.0%	100.0%
Aviation	Fuels	48.4%	12.4%
	Electricity	0.0%	100.0%
Marine	Fuels	83.6%	4.5%
	Electricity	0.0%	100.0%

NB: Dans ce tableau, la première colonne de chiffres titre d'exemple

Source: N. Eyre, 2021

Ces facteurs de conversion ont été utilisés pour calculer, à partir du mix énergétique pré-transition, la demande énergétique post-transition divisée entre combustible (hydrogène) et électricité. À titre d'exemple, indique Nick Eyre, la quantité de combustibles (non électriques – 2^e ligne du tableau ci-dessus) utilisée dans les procédés industriels à haute température tombe à 80% de son niveau pré-transition. Les combustibles fossiles directs pré-transition apparaissent à 67 % sous forme de fuel post-transition (hydrogène), et à 13 % sous forme d'électricité post-transition, les 20 % restants [100%-(67%+13%)] constituant le gain final d'efficacité énergétique pour ce procédé. Pour le même ensemble de procédés, toute l'énergie actuellement fournie par l'électricité reste inchangée.

6. Les principaux résultats

Le tableau ci-dessous, tiré de l'article de Nick Eyre, donne les résultats des calculs :

Énergie finale par type de procédé et combustible : actuelle (20) et post-transition (EJ/an)

	Current			Post-transition	
	Fuels	Electricity	Traditional biomass	Fuels	Electricity
Industry					
High-temperature process	47.2	15.9		31.6	22.1
Low-temperature process	24.2	6.7		0.0	26.1
Drying and separation	12.0	1.7		0.0	4.7
Motors, drives and lighting	0.6	31.4		0.0	32.0
Space heating	8.2	3.8		0.4	3.1
Other	11.6	3.6		0.0	12.9
Total industry	103.8	63.1		32.1	100.9
Buildings					
Space heating	38.4	2.2	3.2	2.0	10.4
Water heating	24.1	4.3	0.0	0.0	10.7
Cooking	0.0	4.1	25.1	0.0	6.0
Lighting, cooling and appliances	0.0	34.3	0.0	0.0	34.3
Total buildings	62.5	44.8	28.3	2.0	61.4

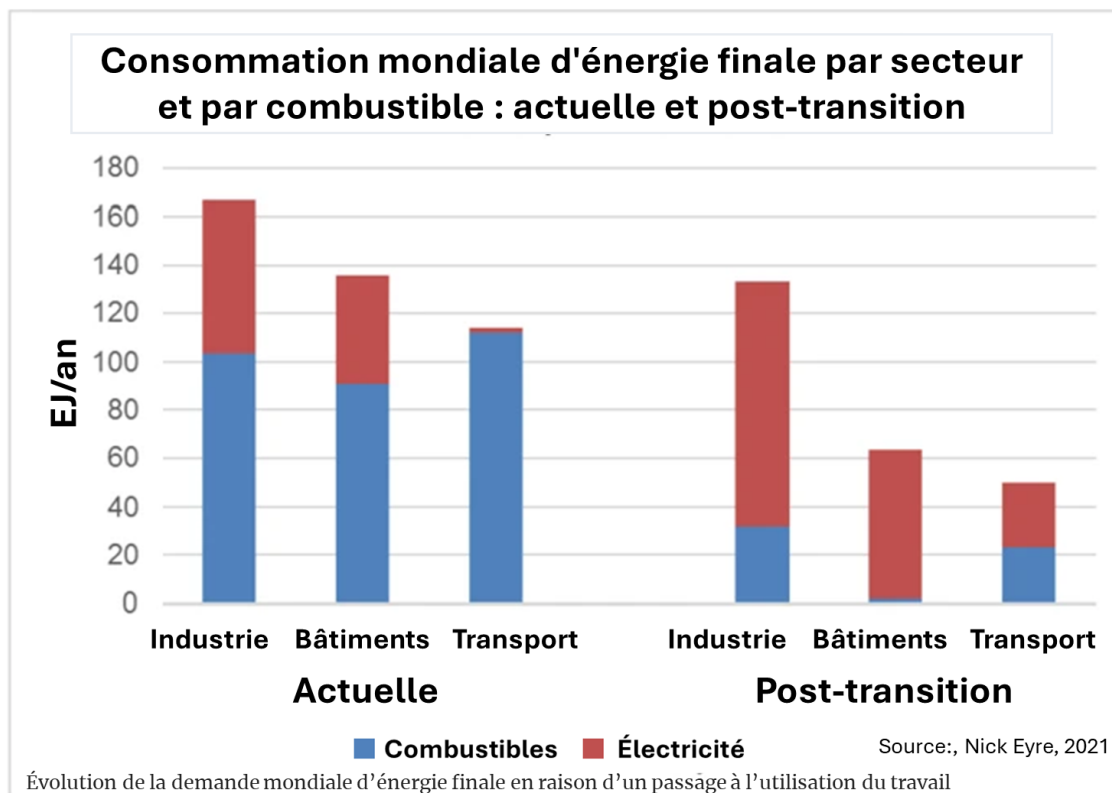
	Current			Post-transition	
	Fuels	Electricity	Traditional biomass	Fuels	Electricity
Transport					
Vans	14.0			0.0	3.2
HGV	15.7			4.7	4.2
Car	40.2			0.0	9.4
Bus	13.9	0.7		2.1	5.8
Motor cycle	1.5	0.2		0.0	0.5
Rail freight	1.6	0.5		0.0	1.2
Rail passenger	0.8	0.4		0.0	0.8
Aviation	11.1			5.4	1.4
Marine	13.0			10.9	0.6
Total transport	111.8	1.8		23.1	27.0
Total all sectors	278.1	109.8	28.3	57.2	189.3

NB: Les combustibles visés en situation de post-transition sont à base d'hydrogène vert, produit à partir des renouvelables Source: N. Eyre, 2021

Les 3 premières colonnes de chiffres représentent la demande finale par combustible et par procédé en 2020, et donc avant transition. La demande totale est de l'ordre 416 EJ/an. Les deux dernières colonnes donnent la répartition de la demande finale par procédé, entre combustible (hydrogène) et électricité en situation de transition. La demande totale se monterait à 247 EJ/an

La principale conclusion de Nick Eyre est la suivante : « *L'impact global des changements résultant de la conversion de l'ensemble du système énergétique, avec un niveau constant de services énergétiques et de demandes d'énergie utile, à un système efficace axé sur les énergies productrices de travail, est une réduction d'environ 40 % de la demande finale d'énergie, de 416 à 247 EJ/an* ».

La figure ci-dessous illustre les résultats obtenus par secteur d'activité, hors transition et post-transition



Comme on peut le voir, c'est dans les bâtiments et les transports que se situent les principaux gains. Les réductions y dépassent 50%. Les remplacements des chaudières à combustibles fossiles par les pompes à chaleur dans les bâtiments et des véhicules thermiques par les véhicules électriques dans le transport font toute la différence. Les différences de rendements de conversion (33% pour les véhicules thermiques contre 80% pour les véhicules électriques) jouent un rôle central

Les gains plus faibles dans l'industrie (20%) reflètent, indique Nick Eyre, « *les rendements élevés déjà obtenus dans les secteurs industriels à forte intensité énergétique et les difficultés à faire passer certaines demandes à l'électricité, en particulier lorsque les*

combustibles jouent un autre rôle, comme matières premières ou comme agents réducteurs chimiques ».

Ainsi qu'on peut s'y attendre (cf. tableau), la part de l'électricité double dans l'industrie (38% à 76%), triple presque dans les bâtiments (de 33% à 97%) et est multipliée par plus de 30 dans les transports (moins de 2% à 54%). Dans l'ensemble, la consommation de l'électricité augmente de 70%, celle de combustible tombe bien en dessous de 20%.

Deux groupes d'hypothèses, simplificatrices d'un côté et critiques de l'autre, sont déterminantes pour ces résultats, indique Nick Eyre.

Les deux hypothèses simplificatrices sont les suivantes :

- ✓ Les seules mesures d'efficacité considérées dans la simulation sont celles liées aux conversions chaleur/travail, travail/chaleur et travail/travail.
Les gains proviennent principalement i) de l'**abandon complet de la première conversion (chaleur/travail)** dont l'inefficacité est reconnue (33% selon la seconde loi de la thermodynamique); et ii) de la **généralisation** des deux dernières (**travail/travail et travail/chaleur**) qui sont bien plus efficaces que la première et réalisent l'adéquation recherchée entre services énergétiques fournis en grande partie par le travail et sources d'énergie (productrices de travail).
- ✓ Les demandes de services énergétiques considérées sont les mêmes dans les deux situations analysées, pré-transition et post-transition.

Les hypothèses critiques sont les suivantes :

- ✓ Toute la chaleur basse température en situation post-transition est fournie par les pompes à chaleur, notamment pour le chauffage et la production d'eau chaude;
- ✓ Les véhicules électriques prédominent dans le parc de véhicules légers. Pour les véhicules lourds, l'hydrogène vert utilisé dans les piles à combustible est privilégié.

7. Conclusion

Courant septembre 2021, Nick Eyre a publié un article intitulé *From using heat to using work: reconceptualising the zero carbon energy transition* (De l'utilisation de la chaleur à l'utilisation du travail : reconceptualiser la transition énergétique zéro carbone). Dans cet article, il affirme que la transition énergétique en cours, fondée sur l'électricité et les sources renouvelables d'électricité (hydro, solaire photovoltaïque et éolien), « sera plus qu'un abandon des combustibles carbonés ». Il propose de la penser avant tout comme un passage, **le passage i) des sources d'énergie productrices de chaleur, à ii) des sources d'énergie productrices de travail.**

Les conséquences opérationnelles de ce changement de perspective novateur sont majeures. Leur analyse montre que des améliorations considérables d'efficacité, notamment dans les processus de conversion de l'énergie primaire en énergie finale, sont possibles dans notre système énergétique. « Une réduction de la demande d'énergie finale allant jusqu'à 40 % est probable grâce à ce seul effet », indique Nick Eyre.

Dans leur article de 2024 inspiré de celui de Nick Eyre, Daan Walter et ses collègues parlent, à propos de ces conséquences, « d'un bond massif de la productivité énergétique,

*une performance qui ne se produit qu'une fois par siècle, comparable au boom de l'après-
Seconde Guerre mondiale, lorsque le pétrole et le gaz ont supplanté le charbon et la
biomasse »*

Ce numéro du bulletin donne un aperçu des idées forces qui fondent cette nouvelle approche de la transition énergétique, une approche qui crédibilise davantage et conforte l'idée d'un monde décarboné grâce à l'électricité et aux sources renouvelables d'électricité.

Une de ces idées forces est que la transition en cours, fondée sur **l'électricité et les sources renouvelables d'Électricité**, permet d'**exclure les conversions chaleur/travail** des transformations successives permettant d'offrir les services énergétiques dont le monde a besoin pour « *chauffer des choses ou les faire bouger* ». Ces conversions aux rendements limités (33%) fournissent aujourd'hui la presque totalité (95%) des services énergétiques.

La nouvelle transition privilégie, a contrario, **les conversions travail/travail et travail/chaleur** qui offrent de bien meilleurs rendements (70%et plus) que la conversion chaleur/travail. L'électricité, fournie par les sources renouvelables d'énergie, est la principale source d'énergie productrice de travail mise à contribution. Ses effets électromagnétiques permettant de produire du travail grâce aux moteurs électriques, et d'agir, au cœur de la matière, sur les électrons et d'en contrôler les mouvements, ont fait la preuve de sa puissance transformatrice à travers des technologies (électronique, informatique, NTIC, IA) qui continuent de changer le monde. Ils la qualifient amplement.

Un certain nombre d'hypothèses, simplificatrices et critiques, ont dû être faites pour les simulations ayant conduit au principal résultat de l'étude de Nick Eyre, laquelle conclut que la transition fondée sur les sources d'électricité renouvelables est bien plus que l'abandon des combustibles fossiles. Elle va bouleverser les processus de conversion énergétique et, conséquemment, les échelles d'efficacité. Ces hypothèses ont été brièvement rappelées dans le bulletin. Comme l'indique l'auteur, elles n'impactent en rien la conclusion générale de l'études qui « *est robuste* ».