

# L'impact de l'énergie sur le développement des sociétés humaines et l'économie globale

Gérard Bonhomme<sup>(1)</sup> (gerard.bonhomme@univ-lorraine.fr) et Henri Safa<sup>(2)</sup> (henri.safa@cea.fr)

(2) CEA, Direction des programmes, CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette

Alors que le poids réel de l'énergie dans l'économie est encore souvent largement

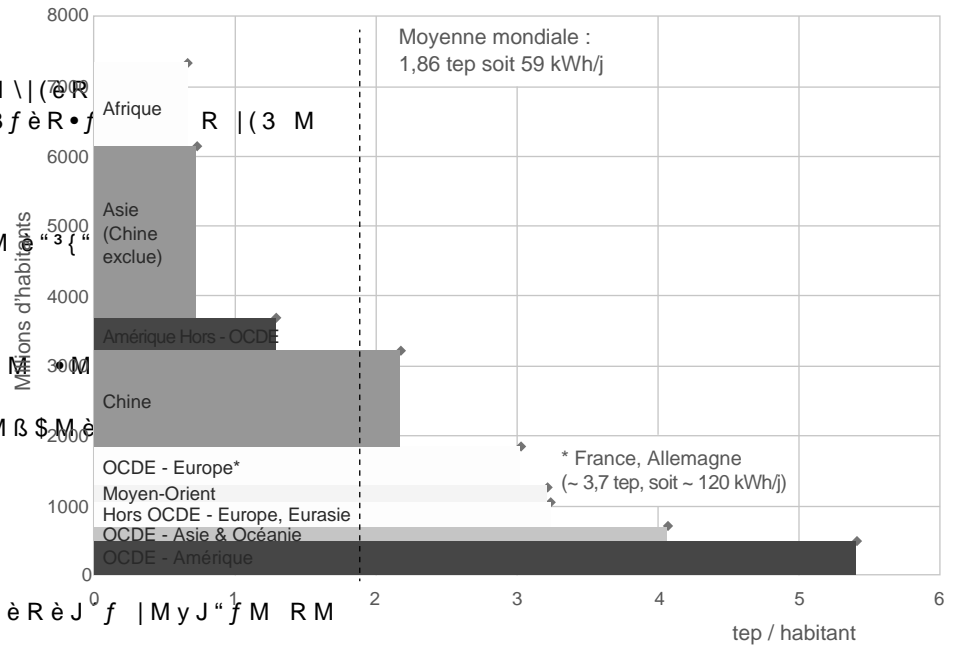
interrelation qui existe entre l'énergie, le développement humain et l'économie.

Dans un contexte de nécessaire croissance des besoins au niveau mondial, et devant l'impérieuse nécessité de décarboner les usages, quelques pistes de réduction des émissions

Les dernières années ont vu le développement des sociétés humaines ne peuvent pas non plus se soustraire. Les distributions régionales de consommation d'énergie par tête dans le monde, montrées par leur très grande hétérogénéité une similitude frappante.

C'est une simple manifestation, bien qu'à gros traits, de la corrélation entre consommation d'énergie et

détails. La distribution géographique de consommation d'énergie primaire en tep par habitant



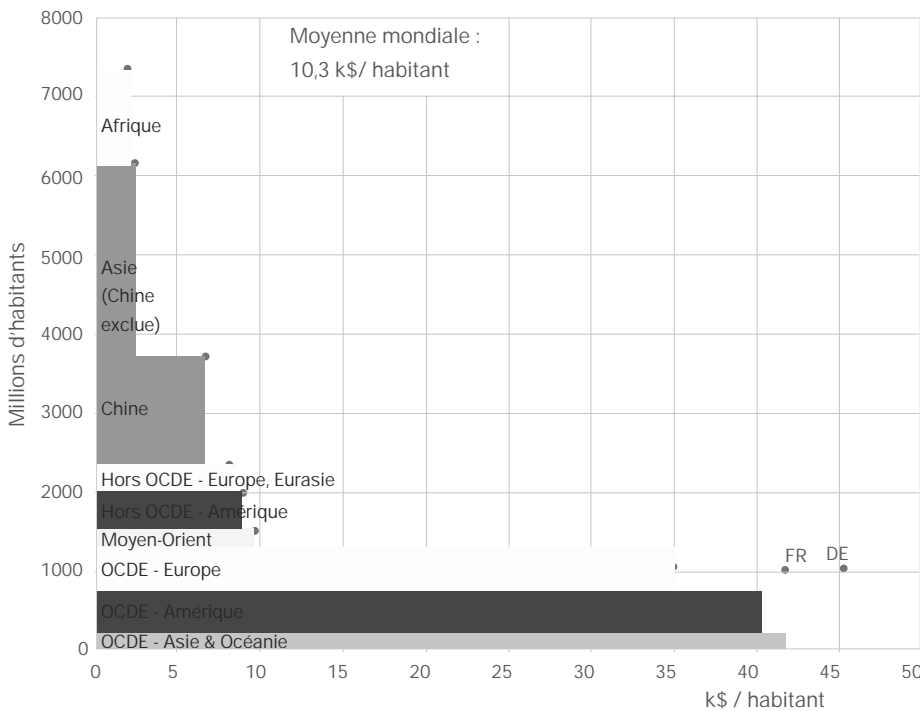
1. Répartition régionale de la consommation annuelle d'énergie primaire par habitant exprimée en tep par habitant (IEA, www.iea.org/).



© Alice Hunter.

■ 0,800-1,000 (très élevé) ■ 0,700-0,799 (élevé) ■ 0,555-0,699 (moyen) ■ données inexistantes

Carte des pays du monde par catégorie d'indice de développement humain (IDH), selon l'ONU en 2021.



2. Répartition mondiale du produit intérieur brut (PIB) par habitant (à partir de données de l'IEA).

doit se contenter actuellement d'environ un tiers de la moyenne mondiale par tête, alors que nous en consommons le double en France. L'évolution démographique et le développement impliquent une croissance des besoins énergétiques au niveau mondial.

Tout d'abord, nous discuterons le rôle de l'énergie dans l'évolution des sociétés humaines à partir de puis en observant la relation entre JFM R 3 M M \$ - J \ y y Q R • M 4 M \$ 15 M • M J è M \ R f \ Q Q è • 3 \ R M par habitant. Nous rapporterons ensuite les résultats totalement \ R \ | è R • f M M “ 3 M è y y | \ / f férentes, qui prouvent le rôle capital M J F R | ( 3 M è R f M J è M \ \ | Q è • Ce rôle est encore largement sous-f • 3 Q M y è | M M R \ Q | “ 3 M \ R \ C alors que l'énergie constitue la mesure universelle des transformations de la matière associées à la création de 3 R f M • M M f | - 3 f # M \$ è R f M partie, nous montrerons que certaines innovations technologiques permettent d'ouvrir des pistes de réduction des émissions de gaz à Đ • M M f | | # M >>>



Ce serait une illusion dangereuse de croire que nous pourrions maintenir une société prospère sans consommer ni énergie ni ressources. Ceci est totalement incompatible avec ce que nous apprend la thermodynamique sur le monde.

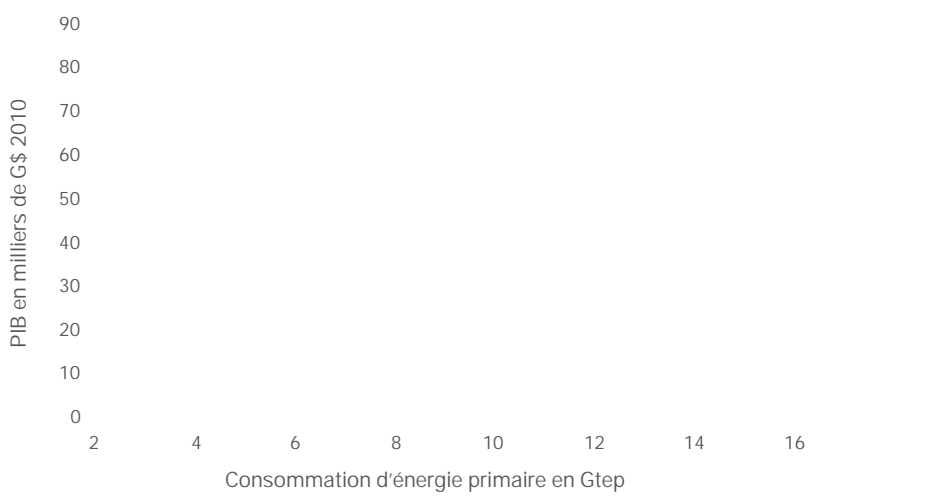
Énergie et Indice de développement humain (IDH<sup>(c)</sup>)

Même si cette réalité incontournable est en outre corroborée par les courants dominants de la science économique, prospérité et développement économique dépendent étroitement de la consommation d'énergie primaire. Néanmoins, les Nations unies pour le développement humain des pays du monde ont depuis 2010, se fondaient alors sur l'espérance de vie à la naissance et le niveau d'éducation des enfants de ce sentent cet indice en fonction de la consommation d'énergie primaire. (i) tous les pays à faible consommation d'énergie primaire n'apparaissent plus de corrélation claire de la consommation d'énergie primaire.

La consommation d'énergie primaire est un indicateur clé de la prospérité et du développement économique. Elle est corrélée à l'IDH, mais la relation n'est pas linéaire. Les données au niveau mondial permettent de constater que la consommation d'énergie primaire par habitant a augmenté de manière constante depuis 1965. Cette augmentation est due à la croissance démographique et à l'industrialisation. Les pays développés ont une consommation d'énergie primaire par habitant plus élevée que les pays en développement. La consommation d'énergie primaire est un indicateur clé de la prospérité et du développement économique. Elle est corrélée à l'IDH, mais la relation n'est pas linéaire. Les données au niveau mondial permettent de constater que la consommation d'énergie primaire par habitant a augmenté de manière constante depuis 1965. Cette augmentation est due à la croissance démographique et à l'industrialisation. Les pays développés ont une consommation d'énergie primaire par habitant plus élevée que les pays en développement.

La consommation d'énergie primaire est un indicateur clé de la prospérité et du développement économique. Elle est corrélée à l'IDH, mais la relation n'est pas linéaire. Les données au niveau mondial permettent de constater que la consommation d'énergie primaire par habitant a augmenté de manière constante depuis 1965. Cette augmentation est due à la croissance démographique et à l'industrialisation. Les pays développés ont une consommation d'énergie primaire par habitant plus élevée que les pays en développement.

La consommation d'énergie primaire est un indicateur clé de la prospérité et du développement économique. Elle est corrélée à l'IDH, mais la relation n'est pas linéaire. Les données au niveau mondial permettent de constater que la consommation d'énergie primaire par habitant a augmenté de manière constante depuis 1965. Cette augmentation est due à la croissance démographique et à l'industrialisation. Les pays développés ont une consommation d'énergie primaire par habitant plus élevée que les pays en développement.



(exprimé à dollar constant) en fonction de la consommation d'énergie primaire.

La raison est que naturellement les facteurs ne sont pas totalement substituables, et que l'énergie en particulier ne peut pas être remplacée.



sans limitations par du travail / "Q è 3 R N ( M \$ f M è y y | \ / f M R è | 3 è " R • M M M ' 3 M ( è ½ M ú M Ð • M modèles analogues mais opérant 4 B - > 5 M { " 3 M è Ð • R • M J R • Q " R M Q è 3 3 Q 3 f è • 3 \ R M f " f M " | \ R • R • R • R • Y • M M J 3 Q è • # M a f (c'est-à-dire prenant en compte les f | | M - è M 3 R " 3 | M " R M | / è " Ð contraintes physiques et technolo- de l'atmosphère qui pourrait poten- tuellement conduire à des évènements catastrophiques incontrôlables sur notre planète dans le courant du 3 Ð | R • f M Q \ R • | è R • M R S è J è | N o u s J e v o u s absolument que l'élasticité pour le facteur éner- ( • 3 { " M f • M M J F \ | | M a d u c t i o n t o t a l e M a é l é m e n t a r e de nos 4 ' # M ' | f M 8 à 9 \$ M \_ T M Q Q é m i s s i o n s d e R G E S . C o m p t e tenu de 8 æ 9 5 \$ M R M y J 3 R M è \ | M m p a c t d e l ' é n e r g i e s u r l ' é c o n o m i e décrit précédemment, la mise en M | f " J • è • M è M • M \ R N o u s M é c o n s i l e p a r c e m a i n s é c o n - 8 P Ý 9 5 M y è | M " R M - è J " è • Q 3 R M f 3 M • F M R M M • è 3 M i è | \ R J F 3 R Ò " R M M J F R | ( 3 M ' 3 | | M J M M è " 1 3 M è " 3 M \ Q " f vités entrant dans la constitution du ' M # M M J M f F è ( 3 • M | • è 3 R é c o n o m i e m é r i t e n e s t s u p p o r t a b l e M i y J " f M ' è f • 3 3 " 3 M • M y J " f o m p a r t i e M a v e c l e s b e s o i n s é n e r g é - qui consiste à dériver les valeurs opti- tiques d'une large part de l'humanité dans les pays en développement.

de régression linéaire, mais dont l'intérêt indéniable est de fournir également des informations détaillées supplémentaires sur l'impact énergétique pour chaque activité ou secteur.

Ces résultats permettent de comprendre l'origine de l'illusion que J è M | \ 3 f f è R M " M ' M M e y r o u v e è B a i l l e u r s | c e m o m b r e , e n découplée de la consommation F R | ( 3 # M \$ M ' è 3 • \$ M • M a t i o n ' e n o R M a l e J a c t u e l l e par évidente, le découplage apparent / è 3 • è R • M M ã Ý N G Æ / 0 D M • R y \ y " J è 3 \ R M M æ N Q 3 J J 3 è | f # a F R \ | Q M Ñ M - è R • M J { " J nous trouvons est donc celui de trouver des solutions techniques économiquement viables permettant une réduction drastique du recours è " 3 M | f f \ " | f M ' \ f f 3 J f M f è autant restreindre la satisfaction des besoins en énergie. L'Union euro- péenne prévoit pour sa part de f \ | • M { " M J " | M \ R • | 3 " • 3 è s p è c t e r l e s a c c o r d s d e P a r i s s u r l e diminué. En conséquence, on a pu observer corrélativement une forte en 2050.

è " ( Q R • è • 3 \ R M " M ' M M y è | M { " è R • 3 • M M F R | ( 3 M Q y J \ ' \$ M \ R L e s i n n o v a t i o n s t e c h n o l o g i q u e s c o m m e l e v i e r s d e l a t r a n s i t i o n

ò S J W L N J J Y Q Z Y Y le changement climatique

La réduction des gaz J K K J Y I J X J W W J

La combustion de ressources fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) J 3 | M " M 3 \ 3 ' M M è h u c l é a i r e e t R e s M é n e r g i e s r e n o u v e l a b l e s . C e c i i m p l i q u e c e r t a i n e m e n t l'atmosphère terrestre. Cette pollution

d'origine énergétique est le principal 4 B - > 5 M { " 3 M è Ð • R • M J R • Q " R M Q è 3 3 Q 3 f è • 3 \ R M f " f M " | \ R • R • R • R • Y • M M J 3 Q è • # M a f (c'est-à-dire prenant en compte les f | | M - è M 3 R " 3 | M " R M | / è " Ð de l'atmosphère qui pourrait poten- tuellement conduire à des évènements catastrophiques incontrôlables sur notre planète dans le courant du 3 Ð | R • f M Q \ R • | è R • M R S è J è | N o u s J e v o u s absolument que l'élasticité pour le facteur éner- ( • 3 { " M f • M M J F \ | | M a d u c t i o n t o t a l e M a é l é m e n t a r e de nos 4 ' # M ' | f M 8 à 9 \$ M \_ T M Q Q é m i s s i o n s d e R G E S . C o m p t e tenu de 8 æ 9 5 \$ M R M y J 3 R M è \ | M m p a c t d e l ' é n e r g i e s u r l ' é c o n o m i e décrit précédemment, la mise en M | f " J • è • M è M • M \ R N o u s M é c o n s i l e p a r c e m a i n s é c o n - 8 P Ý 9 5 M y è | M " R M - è J " è • Q 3 R M f 3 M • F M R M M • è 3 M i è | \ R J F 3 R Ò " R M M J F R | ( 3 M ' 3 | | M J M M è " 1 3 M è " 3 M \ Q " f vités entrant dans la constitution du ' M # M M J M f F è ( 3 • M | • è 3 R é c o n o m i e m é r i t e n e s t s u p p o r t a b l e M i y J " f M ' è f • 3 3 " 3 M • M y J " f o m p a r t i e M a v e c l e s b e s o i n s é n e r g é - qui consiste à dériver les valeurs opti- tiques d'une large part de l'humanité dans les pays en développement.

de régression linéaire, mais dont l'intérêt indéniable est de fournir également des informations détaillées supplémentaires sur l'impact énergétique pour chaque activité ou secteur.

Ces résultats permettent de comprendre l'origine de l'illusion que J è M | \ 3 f f è R M " M ' M M e y r o u v e è B a i l l e u r s | c e m o m b r e , e n découplée de la consommation F R | ( 3 # M \$ M ' è 3 • \$ M • M a t i o n ' e n o R M a l e J a c t u e l l e par évidente, le découplage apparent / è 3 • è R • M M ã Ý N G Æ / 0 D M • R y \ y " J è 3 \ R M M æ N Q 3 J J 3 è | f # a F R \ | Q M Ñ M - è R • M J { " J nous trouvons est donc celui de trouver des solutions techniques économiquement viables permettant une réduction drastique du recours è " 3 M | f f \ " | f M ' \ f f 3 J f M f è autant restreindre la satisfaction des besoins en énergie. L'Union euro- péenne prévoit pour sa part de f \ | • M { " M J " | M \ R • | 3 " • 3 è s p è c t e r l e s a c c o r d s d e P a r i s s u r l e climat en visant la neutralité carbone en 2050.

è " ( Q R • è • 3 \ R M " M ' M M y è | M { " è R • 3 • M M F R | ( 3 M Q y J \ ' \$ M \ R L e s i n n o v a t i o n s t e c h n o l o g i q u e s c o m m e l e v i e r s d e l a t r a n s i t i o n

Une réduction forte et décisive des émissions de GES en quelques décennies ne sera possible que si l'on passe volontairement du bouquet énergétique actuel, qui repose principalement sur les combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz), à des R | ( 3 f M R \ R M Q • • | 3 f M M ( de serre, comme l'hydroélectricité, le è h u c l é a i r e e t R e s M é n e r g i e s r e n o u v e l a b l e s . C e c i i m p l i q u e c e r t a i n e m e n t l'atmosphère terrestre. Cette pollution

un recours accru à l'électricité dans  
J f m " f è ( f M Ñ R è " 3 M 4 J J M R F R M \ " - | M  
è " J J Q R • M R M - " \ | y M { " M ß à N t 5 \$ D M ú M F / " 3 \$ M J M • | è R f y \ B i m q u e M é n e r g i e - n e p è s e q u ' e n t r e  
 \ R 3 • 3 \ R M 3 R M f — | M { " M J è M y \ | m i e n t 3 U B o m d a n t d e s r e s s o u r c e s ß M • M ä N t M " M ' M M è R f m J j  
d'énergie électrique soit elle-même y • \ | J 3 | f m y " 3 f { " M a d y s y à f M \ M 3 R R • è " 3 \$ M f \ R M 3 Q y  
décarbonée, ce qui est loin d'être le l'énergie mondiale utilisée pour le est cruciale dans toutes les activités  
cas pour tous les pays européens. le transport est constituée de produits de nos économies modernes, car elle  
L'Union européenne prévoit ainsi è Ð • M y J " f M M ä Y N t M f M  
" R M | \ 3 f f è R M M â à N t M M J è M d e s r é s é e n e r g é t i q u e d e s c o m b u s t i b l e s p r o d u c t i o n e n F r a n c e . C e r ô l e v i t a l d e  
mation d'électricité à l'horizon 2050. J 3 { " 3 f m 4 P ð ä Y Y N Æ / O G ( J # R a | ( M | M \ " f f M ú M R M f — | M  
a f m " f è ( f M Ñ R è " 3 \$ M { " 3 M | y \ f e l e c t r i q u é , s o i t d i r e c t p a r u t i l i s a t i o n a c c o r d a v e c l e s l o i s d e l a n a t u r e e t  
Q è D \ | 3 • è 3 | Q R • M f " | M J f m | f f d e m o t e u r s é l e c t r i q u e s a l i m e n t é s s o i t d e l a t h e r m o d y n a m i q u e , q u i s ' a p -  
fossiles, concernent d'une part des par des batteries électrochimiques, y J 3 { " R • M è " f f 3 M è " 3 M • | f m •  
besoins en chaleur pour le résidentiel soit par des piles à combustibles à è " 3 M f \ 3 • f M / " Q è 3 R f # M a F  
et le tertiaire et d'autre part le secteur en dépit de verrous technologiques ou de la contribution de l'énergie à J F - \ J " • 3 \ R M " M ' M M Q \ R • | M  
des transports. / R R \ Q 3 { " f m f y 3 Ñ { " f m p o s s i b l e d a n s l ' é c o n o m i e e s t t e l q u e  
\$ " 3 M y 3 f • f m F 3 R R \ - è • 3 \ R f m • / R R \ Q 3 { " f m f y 3 Ñ { " f m p o s s i b l e d a n s l ' é c o n o m i e e s t t e l q u e  
logiques pourraient ouvrir la voie à " R M - | 3 • è J M • | è R f 3 • 3 \ R M R | ( • 3 { " N % M l a s u b s t i t u t i o n , o u b i e n d e c a p i t a l  
" R M - | 3 • è J M • | è R f 3 • 3 \ R M R | ( • 3 { " N % M 4 y \ " | M è " ( Q R • | M y è | M 3 Q y J  
J M y è f f è ( M è " 3 M - / 3 " J f m J • | 3 U t o r s s i m p l e m e n t à c e s t a d e q u e 3 c a c i t é é n e r g é t i q u e , o u b i e n d e m a i n  
pour le transport routier et la récu- J 3 U t o r s s i m p l e m e n t à c e s t a d e q u e 3 c a c i t é é n e r g é t i q u e , o u b i e n d e m a i n  
pération de la chaleur perdue, dite ' è • è J \$ M f m R • | è J f m J • | 3 { " r é m p l a c e r l e s c a r b u - d o n c b i e n u n e i l l u s i o n d a n g e r e u s e  
' è • è J \$ M f m R • | è J f m J • | 3 { " r é m p l a c e r l e s c a r b u - d o n c b i e n u n e i l l u s i o n d a n g e r e u s e  
pour les logements, les centres d'af " R M 3 R Ò " R M R \ • è J \$ M d a n t e r i r l e s s e c t e u r s a u h a u t n i v e a u  
fares et les processus industriels. J • | 3 { " a u g m e n t a t i o n d e s b e s o i n s e n é n e r g i e d e s e r v i c e s t o u t e n r é d u i s a n t d r a s t i -  
Nous allons donner ici un aperçu de J • | 3 { " # M - R M Ð • \$ M J é l e m é n t l a c o n s o m m a t i o n d ' é n e r g i e  
f m " 3 M • / R \ J \ ( 3 f m Q è D " | f m e n v i s a g é e p a r l a F r a n c e à l ' h o r i z o n • M M | f f \ " | f # M a F R \ | Q  
rupture. ß Y à Y M M J F / ' \ ( R M è " r e m p l a c e r , d a n s d e c o u r t s d é l a i s à c a u s e  
de l'urgence climatique, est de mettre

### Cogénération et production de chaleur décarbonée

Une part importante des besoins en énergie est la chaleur, et ces  
f \ 3 R f m \ | | f y \ R R • M y \ " | M ä à N t M è R | è 3 • M M J F \ | | M d e m e s y o u n a n t e s e t m e s b e s o i n s e n  
F R • | M " 3 M ú M " R M / è J " | M ú M d ' é n e r g i e é l e c t r i q u e , c ' e s t - à - d i r e a u t a n t q u e l a c o n s o m m a t i o n  
température, c'est-à-dire inférieure autant que la consommation  
à 120°C. Or, pour des raisons liées annuelle actuelle.  
à " 3 M J \ 3 f m M J è M • / | Q \ ' R è Q 3 { " \$ M J M  
processus de conversion d'énergie  
primaire en énergie électrique  
génère aussi, dans des proportions  
dépendant de la température de la  
source chaude, d'énormes quantités  
de chaleur fatale (en 2018, sur les  
à \$ á à N B • y M F R | ( 3 M F R • | é M e u d e s Q R M J J M " M i Æ / 0 / è 0 è R # M à M \ R f \ Q Q è 3 \ R M è • " J J M F R  
tant l'ensemble des centrales élec y \ y " J è • 3 \ R M M Þ \$ Þ á N / è 0 / è M \ | | f y \ R M ú M á Y N B Æ / 0 / è 0 è R # M 4 " Q è | { " N 9  
• | 3 { " f m è R f m J M Q \ R \$ M ß \$ á à N B • y M F R | ( 3 M F R • | é M e u d e s Q R M J J M " M i Æ / 0 / è 0 è R # M à M \ R f \ Q Q è 3 \ R M è • " J J M F R  
• M (è f y 3 J J f N ( 5 # M t R M ( è 4 R 5 M à 3 M M ú M J | M " \ | R 3 • M Þ Þ ä Y Y N Æ / O G ( \$ M ú M \ Q y è | | M è " 3 M ß Y Y Y M ú M á Y  
pérer cette énergie perdue pour  
satisfaire une partie de nos besoins  
en chaleur, sous réserve que la  
température à laquelle se fait la  
récupération puisse alimenter des  
| f è " 3 M M / è J " | M è " M 4 3 M R M \ R \ Q 3 \$ M " R M \ R • 3 \ R M M m y \ | " • 3 \ R M 3 y | 3 Q M f \ " f m \ | Q M F {  
| / è " Ð | M J F è • Q \ f y / | \$ M J F è \$ M ( J è 3 M M M 1 7 0 8 E - 1 0 9 0 \$ M M J è M \ R • 3 \ R M M y \ | " • 3 \ R M f • M \ • R " M ú M y è |  
rivières ou encore la mer. C'est le 4 3 5 M i M f • M " R M \ R • 3 \ R M F • è • M \ " J Q R • M z , ß Ð \ | M R \ 3 è R J • M J è Y 3 J J è 3 M M  
principe de la cogénération, à | J è • 3 \ R f m M i è 3 0 J M M 3 R M 3 3 5 M 3 \ R R J J M J 3 R è 3 | M / \ Q \ ( R \$ M M { " 3 M  
laquelle un article de M. Leurent et condition qu'un doublement du système de production, par doublement de chacun des facteurs de  
I # N › è ' è M f • M \ R f è | M è R f m J è 3 M J è 3 M M f m ' è • " | f m M y \ | " • 3 \ R \$ M F f • < ú < 3 | M { " M J F \ R M y \ | | è  
partie (p. 73). J F R | ( 3 M y è | M M J è M Q è 3 R M F x " - | M 4 ' # M " # M \_ T M Q Q J M e t a l , N e w J o u r n a l o f P h y s i c s

(a) L'invention de l'agriculture a permis un saut d'environ un facteur 1000 dans la quantité moyenne de  
| f f \ " | f m 4 R " | | 3 • " | M y \ " | M J f m \ | Q Q f m • M J f m è R 3 Q è " 3 M F J - è ( 5 M { "  
de production K, L, E (capital, travail, énergie) d'une organisation et la quantité produite. La forme dite de  
4 5 M a F M \$ I M f • M \ R M f " | M " R M y \ R | è • 3 \ R M R • | M ' M \$ M R 3 - è " M F  
- J \ y y M R M Þ æ æ Y M y è | M J L \ R \ Q 3 f • M 3 R 3 R M Q è | • è M › R \$ M y | 3 3  
y è G 3 f • è R è 3 f m i è / " M " J M i è { # M \ " | M \ R R è 8 • | M J f m • è 3 J f m M J è M \ Q y  
/ " Q è 3 R M \ R f " J • | M J M f 3 • M f m j è • 3 \ R f m " R 3 f m ú M J F è | f f M f " 3 - è R • N % M  
4 3 5 M i M f • M " R M \ R • 3 \ R M M y \ | " • 3 \ R M 3 y | 3 Q M f \ " f m \ | Q M F {  
de production K, L, E (capital, travail, énergie) d'une organisation et la quantité produite. La forme dite de  
4 3 5 M i M f • M " R M \ R • 3 \ R M M y \ | " • 3 \ R M f • M \ • R " M ú M y è |  
condition qu'un doublement du système de production, par doublement de chacun des facteurs de  
production, conduite à un doublement de la production. Mais cette solution suppose une complète  
J F R | ( 3 M y è | M M J è M Q è 3 R M F x " - | M 4 ' # M " # M \_ T M Q Q J M e t a l , N e w J o u r n a l o f P h y s i c s