Un exemple de calcul précis de la période optima de remplacement d'un matériel

Remplacement des roues de turbines dans une installation hydroélectrique

Calculating the most economical working life of a hydraulic turbine runner

PAR M. DANIEL

INGÉNIEUR EN CONSTRUCTIONS CIVILES DIPLOMÉ PAR L'ÉTAT
AUDITEUR AU CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS
CHAIRE ET LABORATOIRE D'ÉCONOMIE INDUSTRIELLE ET STATISTIQUE

L'usure des roues de turbines hydrauliques abaisse notablement leur rendement : il en résulte soit des pertes d'énergie, soit un gaspillage d'eau. Leur remplacement se traduit par des frais et des pertes d'énergie. — Calcul de la période optimum de remplacement, dans le cas où l'eau est surabondante, puis dans celui où elle doit être économisée. — Exemple de calcul pratique de la période optimum; estimation du préjudice causé par une erreur d'appréciation.

Wear of hydraulic turbine runners greatly reduces their efficiency, either from losses of energy or from losses of water. Replacing them involves expense and losses of energy. Calculation of the optimum period for replacement in the two cases where water is either superabundant or must be conserved. Example of practical calculation; estimate of losses caused by an error in calculating the optimum period before replacement.

Dans son cours d'Hydraulique générale de 1942-43, M. EYDOUX, professeur à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, après avoir montré la perte annuelle considérable qui peut résulter de l'emploi d'une roue de turbine ayant un rendement de 70 %, au lieu d'une roue à rendement de 85 %, s'exprime comme suit :

« D'autre part, les roues peuvent, dans certains cas, s'user très vite, parfois en 400 jours, et le rendement diminue rapidement avec l'usure. Or, pour le changement d'une roue, il faut compter, en plus de la perte correspondant à un jour perdu, une somme de 30 à 50.000 F pour des turbines moyennes, parfaitement négligeable au regard de la perte qu'occasionnerait une marche prolongée à faible rendement par suite de l'usure de la roue.

« Pour toutes ces raisons, on voit qu'il faut faire des mesures sérieuses de rendement au début pour être sûr d'obtenir les chiffres de garantie et qu'en outre il faut faire des vérifications fréquentes du rendement en cours d'exploitation; il est intéressant de les faire avec le maximum de précision possible, surtout en ce qui concerne les essais de réception, car un gain de 1 % sur le rendement entraîne dans l'exemple précédent un bénéfice annuel de 75.000 F. »

A la lecture de ce passage, l'idée nous est venue de faire un calcul économique pour déterminer rationnellement la période optima de remplacement d'une roue de turbine pour cause d'usure. Ce calcul peut avoir en effet un grand intérêt pour les roues s'usant rapidement : roues Pelton (hautes chutes) ou roues-hélices (basses chutes) et dans les cas d'eau chargée. Dans les autres cas, la question n'est peut-être jamais négligeable.

Le vieillissement de la turbine dû à l'usure de celle-ci n'a pas les mêmes conséquences dans les usines au fil de l'eau et dans les usines à réservoir.

Dans le premier cas, l'eau non turbinée au passage est perdue par déversement. Il s'agit alors, pour chaque turbine en service, d'utiliser au maximum l'eau qui lui est offerte à chaque instant par le cours d'eau. La baisse de production électrique est seule en cause, tout à fait indépendamment de la consommation d'eau, celle-ci étant gratuite.

Dans le second cas (réservoir à niveau variable), l'eau non utilisée par la turbine demeure stockée dans le réservoir où elle représente une énergie disponible. Le débit du réservoir est réglé rationnellement et, en première approximation, indépendamment de l'usure des turbines, par modification du nombre des turbines en service; d'autre part, le débit de chaque turbine en service est réglé, par manœuvre automatique du distributeur et quelquefois des aubes, de manière à donner l'optimum, c'est-à-dire ici le maximum de rendement hydraulique. Le volume d'eau par kWh produit, consommé en plus, du fait de l'usure, correspond donc à une perte d'énergie due uniquement à la perte de rendement technique. La distinction entre les deux cas n'est d'ailleurs pas si nette qu'on pourrait le croire à la lecture de ce qui précède. Certaines usines au fil de l'eau peuvent en effet, en période d'étiage, travailler à hauteur de chute variable, le barrage mobile étant complètement fermé. Cette réflexion nous conduit à distinguer, ici, au lieu des deux cas concrets du barrage réservoir et de l'usine au fil de l'eau, les deux cas théoriques suivants :

A : L'eau est surabondante. Elle ne représente pas une énergie à économiser;

B : L'eau est stockée. Elle représente une énergie à économiser pour les besoins futurs.

Nous remarquerons en passant que la technique de la construction des turbines, tout orientée par la notion du rendement maximum, semble être faite uniquement pour le second cas. On pourrait cependant imaginer, pour les installations travaillant en déversoir au fil de l'eau, une technique de construction basée sur la plus grande puissance au moindre investissement. Notamment certaines usines installées très au-dessous d'un grand fleuve ou d'un lac ne prennent qu'une faible partie du débit et ont une hauteur de chute pratiquement constante. Dans la construction des turbines, il peut alors paraître avantageux de subordonner le rendement qui peut ici, en somme, être quelconque à l'économie du coût de construction, en particulier à la simplification du profil d'aube (*).

A. — Cas où l'eau est surabondante

C'est en principe le cas des usines au fil de l'eau. Nous avons vu que dans ce cas le rendement technique n'a pas d'importance, puisque la quantité d'eau consommée ne compte pas. Ce qui compte, c'est la quantité d'énergie fournie au réseau et qui sera diminuée du fait de l'usure de la roue. A quelle variable peut-on rattacher le degré d'usure de la roue? En général, ce degré d'usure semble être surtout une fonction du débit cumulé turbiné par la roue. On peut admettre qu'il est seulement fonction du temps lorsque la hauteur de chute varie peu et que la turbine est constamment utilisée au maximum. Ce qui est une condition suffisamment réalisée en fait : en effet, dans une installation au fil de l'eau, on se contente souvent, pour s'adapter au régime du fleuve, de modifier le nombre des turbines en marche sans faire varier leur régime, lequel est ainsi maintenu au maximum sauf pour l'une d'elles qu'on règle, en période de basses eaux, de manière à utiliser tout le flux d'eau disponible sans faire baisser la hauteur de la retenue maintenue de manière à obtenir la puissance maximum des autres turbines.

En définitive, nous prendrons pour variable rattachée au degré d'usure une quantité s (service de la turbine) qui pourra être, suivant les cas, soit le temps, soit le débit cumulé lequel n'a pas besoin d'être connu avec précision, soit encore, ce qui paraît le plus simple, l'énergie cumulée fournie, lorsque celle-ci est suffisamment proportionnelle au débit cumulé, c'est-à-dire lors-

(*) Cette simplification du tracé des profils paraît pouvoir être conçue dans ce cas, non seulement en vue d'une réduction de la dépense de façonnage, mais aussi, éventuellement, en vue d'une réduction de la vitesse d'usure, du fait d'un moindre frottement de l'eau sur les aubes.

que le régime de la rivière est tel que la hauteur de chute soit suffisamment constante (abstraction faite de très courtes périodes de grosse crue ou d'étiage).

CALCUL DE LA PERTE

Si l'on appelle U_0 l'énergie fournie initialement par la turbine pour un accroissement unitaire de la variable *s*, *s* étant la variable indépendante choisie (temps de fonctionnement écoulé, ou débit cumulé ou encore énergie cumulée fournie), la perte instantanée d'énergie, pour une valeur *s* de la variable, sera représentée par :

$$d\,E = U_0\,\alpha\,(s_1)\,ds$$

α étant une fonction croissante de *s* représentant la perte de puissance due à l'usure.

La valeur en francs de cette perte instantanée d'énergie sera :

$$d\,\pi = p\,U_0\,\alpha\,(s)\,ds$$

p étant le prix de vente du kWh aux services de distribution.

Cette perte est *a priori* imputable à trois causes :

1. Le vieillissement de la roue;
2. Le vieillissement de la conduite d'amenée;
3. Le vieillissement de l'alternateur.

Mais dans le laps de temps de l'usure de la roue, les causes (2) et (3) sont négligeables vis-à-vis de (1).

B. — Cas où l'eau est mise en réserve

Ici, chaque mètre cube d'eau stockée représente une énergie qu'il importe de ne pas gaspiller. La puissance fournie n'est pas en général la puissance maximum que peut fournir l'installation. Une usine à réservoir journalier peut avoir à fournir les pointes et à assurer la dentelle du diagramme à la demande du réseau. Le débit doit donc s'adapter très rapidement à la demande de puissance du réseau et à la hauteur de chute de manière à maintenir une tension sensiblement constante aux bornes de l'alternateur. Cette adaptation se fait par la manœuvre automatique du distributeur d'eau dont le servomoteur est commandé par de faibles variations de tension électrique. La puissance fournie demeure donc la même que si la roue ne s'usait pas, mais le rendement de celle-ci diminuant, la consommation d'eau augmente, et c'est cette augmentation de consommation à valeur donnée de la puissance demandée qui représente la perte encourue du fait de l'usure des aubes. Le calcul ne sera donc pas, en principe, le même que dans le cas A.

D'autre part, la hauteur de chute étant ici variable, il n'y a pas en général corrélation entre le temps ou le débit cumulé et l'énergie fournie. Cependant nous remarquerons que si l'usine est placée très bas, cette variation de hauteur peut n'être qu'une faible fraction de la hauteur de chute, en sorte que la variation relative demeure faible, plus faible même souvent que pour une usine au fil de l'eau où le niveau aval peut varier beaucoup, la hauteur de chute allant même jusqu'à s'annuler en cas de crue.

Nous admettrons donc (il ne s'agit que d'un dégrossissage du problème) que la hauteur de chute est constante et égale à la moyenne des hauteurs réelles; la perte d'énergie pourra alors, ici encore, être considérée comme exclusivement fonction de la variable *s*, par l'intermédiaire, cette fois, du rendement technique.

CALCUL DE LA PERTE

La perte de rendement pour la valeur s_1 de la variable sera représentée par $\beta\,(s)$, β étant une fonction croissante de (s_1).

La perte d'énergie instantanée est :

$$d\,E = U_0\,\beta\,(s)\,ds$$

Cette formule ne diffère de celle du cas A que par la substitution de la fonction β à la fonction α.

On en déduira la perte instantanée en francs :

$$d\,\pi = p\,U_0\,\beta\,(s)\,ds$$

Tandis que dans le cas A, α représentait un coefficient de chute de puissance, dans le cas B, β représente un coefficient de chute de rendement.

C. — Recherche de l'optimum

Nous voyons que dans les cas A et B, l'expression de la perte élémentaire d'énergie due à l'usure de la roue a la même forme analytique à la signification près du coefficient de perte :

Premier cas A :

$$d\,\pi = p\,U_0\,\alpha\,(s)\,ds \tag{1}$$

Deuxième cas B :

$$d\,\pi = p\,U_0\,\beta\,(s)\,ds \tag{2}$$

Nous continuerons le calcul avec la formule :

$$d\,\pi = p\,U_0\,\alpha\,(s)\,ds$$

étant entendu que, dans le cas B, α doit être remplacé par β.

La perte $d\,\pi$ est évidemment d'autant plus petite que le remplacement est plus fréquent. Mais cet avantage du remplacement fréquent est compensé par les frais et sujétion dudit remplacement.

Soit Δ le service total de l'exploitation considéré comme donné et N le nombre de remplacements, que nous supposerons être un nombre entier assez grand. Si on désigne par S le service accompli par chaque roue, entre sa pose et son remplacement, on a :

$$\Delta = N\,S$$

La perte est une fonction croissante de S, la dépense totale de remplacement est proportionnelle à $N = \Delta/S$.

Il s'agit de déterminer S de telle sorte que le total de la dépense de remplacement et de la perte en kWh soit minimum.

Pour une roue maintenue en exploitation jusqu'au service S, la dépense comprend :

— Des frais d'exploitation (surveillance, graissage), qu'on peut supposer proportionnels au temps, qui sont en tout cas indépendants de l'état d'usure de la roue; il n'y a pas à en tenir compte;

— La dépense d'achat de la roue E;

— La dépense de dépose et de repose F.

Dans le cas A, il faut y ajouter la valeur G du nombre de kWh non produits pendant le temps d'immobilisation de l'installation du fait du remplacement de la roue.

Pour calculer la dépense globale afférente à la roue, il faudrait, en toute rigueur, tenir compte du fait que, en raison de l'intérêt de l'argent, une dépense faite à une époque n'est pas équivalente à la même dépense, faite à une autre époque. En fait, si la durée de service de la roue est assez faible (ce qu'on peut admettre, même pour les turbines à service intermittent), on peut négliger la considération des intérêts.

La dépense totale (y compris les pertes) afférente à la roue est alors supposée faite à un moment quelconque du temps de service de la roue, et elle est égale à la somme des dépenses élémentaires :

$$D = E + F + G$$

Pour le calcul, nous supposerons linéaire la loi d'usure $\alpha\,(s)$ qui devient $\alpha\,S$; on trouve alors pour expression de D, en posant, pour simplifier l'écriture, $E + F + G = b$ et $p\,U_0\,\alpha = K$:

$$D = b + K \int_0^S s\,ds = b + \frac{K\,S^2}{2}$$

étant entendu que S représente, suivant la variable adoptée, soit la durée du service de la roue, soit la quantité d'eau turbinée par elle pendant cette durée, soit la quantité d'énergie correspondante; quelle que soit la signification attribuée à cette quantité S, nous la désignerons par le mot « période ». Du moment que nous faisons abstraction des intérêts, nous pouvons aussi bien considérer cette dépense D comme uniformément répartie le long de la période, avec une valeur moyenne par unité de la variable s, égale à :

$$\delta = \frac{D}{S} = \frac{b}{S} + \frac{K\,S}{2}$$

Le régime de remplacement optimum est celui qui correspond au minimum de δ. On peut expliquer ce fait, assez intuitif, en considérant que δ n'est autre que le coût moyen par unité de service fait. On peut aussi, plus explicitement, raisonner comme suit : soit, à une époque quelconque de l'exploitation de l'installation, Σ une quantité de service fait quelque peu supérieure à la période de renouvellement. Si cette période est S', le coût sera :

$$D' = \delta'\,S' + \delta'\,(\Sigma - S') = \delta'\,\Sigma.$$

Si la période est S'', le coût sera :

$$D'' = \delta''\,S'' + \delta''\,(\Sigma - S'') = \delta''\,\Sigma$$

supérieur ou inférieur au précédent, selon que $\delta'' \gtrless \delta'$.

Le minimum correspond bien au minimum de δ donné immédiatement par l'équation :

$$\frac{d\,\delta}{d\,S} = -\frac{b}{S_0^2} + \frac{K}{2} = 0$$

où $S_0 = \sqrt{\frac{2\,b}{K}}$ avec $K = p\,U_0\,\alpha$ ou $p\,U_0\,\beta$, selon le cas.

Lorsque la variable s désigne le temps, la formule ci-dessus donne immédiatement les époques de remplacement des roues. Pour le cas où la variable désigne le débit turbiné, nous savons que des études très soignées ont été faites indiquant pour les usines un programme rationnel de turbinage dans le temps. C'est à l'aide de ce programme que l'on pourrait préciser les époques de remplacement des roues.

Si au lieu de remplacer la roue tous les S_0 on la remplace seulement en moyenne tous les $S_1 > S_0$ (le remplacement d'une roue trop tôt semble peu probable hors du cas d'accident), on a une perte moyenne d'argent par accroissement unitaire de la variable s égale à :

$$\frac{\frac{K}{2}\,S_1^2 + b}{S_1} - \frac{\frac{K}{2}\,S_0^2 + b}{S_0} = \left(S_1 - S_0\right)\left(\frac{K}{2} - \frac{b}{S_1\,S_0}\right)$$

Si l'on se trompe de $100\,n$ % sur la période de remplacement, on a :

$$S_1 = S_0\,(1 + n)$$

et la perte unitaire est :

$$n\,S_0\left[\frac{p\,U_0\,\alpha}{2} - \frac{b}{(1+n)\,S_0^2}\right]$$

et la fraction du chiffre d'affaires que représente cette perte est :

$$\frac{n\,S_0}{p\,U_0}\left[\frac{p\,U_0\,\alpha}{2} - \frac{b}{(1+n)\,S_0^2}\right]$$

D. — Détermination des valeurs des α et β

Nous ne savons pas si les fonctions de décroissance de puissance α et de rendement β du fait de l'usure de la roue ont déjà fait l'objet de mesures précises. Il serait utile, s'il existe à tout le moins une loi moyenne, de connaître la courbe de cette loi.

Le coefficient α est un coefficient de réduction de puissance. Pour le déterminer en première approximation, on pourra par exemple procéder comme il suit :

On mesurera la puissance électrique initiale dans certaines conditions de marche : niveau amont, niveau aval. On débitera sur des résistances liquides (car la consommation du réseau est trop variable pour permettre une mesure). C'est la mesure de U_0 à l'époque t_0 et pour la valeur s_0 de la variable indépendante.

A l'époque t_1 de fonctionnement on s'efforcera d'avoir les mêmes niveaux amont et aval ou bien l'on fera si possible les corrections nécessaires. On obtiendra une nouvelle mesure U_1 :

De :
$$U_1 = U_0\,(1 - \alpha\,s) \tag{3}$$

on tire α.

La détermination du coefficient β est plus délicate. Il s'agit d'un coefficient de baisse du rendement technique.

En appelant P la puissance électrique aux bornes de l'alternateur, q le débit instantané, ρ le rendement de la roue, θ le rendement de l'alternateur, H la hauteur de chute nette, on a, au début de l'installation d'une roue .

$$P_0 = H\,q_0\,\rho_0\,\theta$$

A un autre moment, en admettant constant le rendement de l'alternateur, la puissance pour la même hauteur de chute H sera :

$$P_1 = H\,q_1\,\rho_1\,\theta$$

d'où :

$$P_1 = P_0\,\frac{q_1}{q_0}\,\frac{\rho_1}{\rho_0}$$

mais $\rho_1 = \rho_0\,(1 - \beta\,S)$, de sorte qu'on a :

$$P_1 = P_0\,\frac{q_1}{q_0}\,(1 - \beta\,S) \tag{4}$$

équation d'où on tirera β, S étant l'accroissement de la variable indépendante dans l'intervalle $t_1 - t_0$.

Il ne suffit donc pas de faire les mesures électriques de P_0 et de P_1, il faut aussi mesurer q_0 et q_1. Ce sont des mesures de débit, plus difficiles et moins précises (on admet ± 2 % d'erreur maximum). C'est une objection qui semble importante pour l'utilisation des calculs, car l'erreur est de l'ordre de la différence des quantités à mesurer. On peut imaginer que des mesures soignées en laboratoire sur modèles réduits puissent donner de bons résultats grâce à la propriété des turbines semblables d'avoir le même rendement. La difficulté serait d'obtenir la similitude de l'usure mais elle ne paraît pas insurmontable puisqu'on fait des études d'érosion sur modèles réduits.

Cependant, il serait beaucoup plus élégant d'éviter toute mesure de débit et la chose paraît possible à l'aide d'une étude de corrélation. En effet, une turbine étant donnée et fonctionnant sous une hauteur nette H, on fait débiter l'alternateur sur une résistance liquide bien connue. La turbine tournant à sa vitesse de régime automatiquement réglée absorbe un débit q_0 sous une ouverture ω_0, l'alternateur fournissant une puissance P_0. Or la vitesse étant constante, il y a corrélation simple entre le débit et l'ouverture ω sous une hauteur nette donnée de sorte qu'il existe une courbe ouverture-débit caractéristique de la turbine. Un groupe de telles courbes pour différentes valeurs de H paraît même pouvoir être tracé au moins en première approximation à l'étude de la turbine, de sorte que la simple lecture de l'ouverture (position du distributeur) donnerait le débit comme une lecture sur les appareils électriques donne la puissance fournie.

P_0 et P_1, q_0 et q_1 étant lus pour des valeurs de la variable indépendante différent de S, la formule (4) donne β.

L'application du procédé peut permettre, par la multiplicité des mesures, des observations de nature à préciser les courbes $q=f(\omega)$ et $\beta=g(s)$.

Cette dernière relation résoud le problème entièrement puisqu'un simple calcul donne ensuite la période optima de remplacement.

On peut encore, comme nous l'avons déjà dit, calculer pour une hauteur nette donnée, et une résistance liquide donnée, la puissance à la fin d'une période optima et remplacer la roue quand cette puissance est atteinte.

E. — Comparaison des valeurs de α et β

Supposons qu'on prenne le temps pour variable et qu'on fasse des mesures P_0 et P_1, q_0 et q_1 à un an d'intervalle ($t = 1$). On mesure, par exemple :

$$P_1 = 0{,}98\ P_0$$

La formule (3) (cas A) donne :

$$0{,}98\ P_0 = P_0\,(1 - \alpha) \quad \text{d'où} \quad \alpha = 0{,}02.$$

Or, supposons qu'entre les deux mesures, et du fait de l'usure et des tourbillons, le débit instantané ait diminué de telle façon que $q_1/q_0 = 0{,}99$.

La formule (2) (cas B) donne alors :

$$0{,}98\ P_0 = P_0 \times 0{,}99\,(1 - \beta\ S),$$

ou, si l'on prend pour unité de S la quantité d'eau turbinée dans l'année :

$$0{,}98\ P_0 = P_0 \times 0{,}99\,(1 - \beta)$$

d'où :

$$\beta = 1 - \frac{0{,}98}{0{,}99} = 0{,}01$$

L'écart entre β et α est du simple au double et la période de remplacement calculée sera très différente. Les deux coefficients ne sont donc pas du tout équivalents.

Aussi la formule (1) convient-elle aux usines où l'eau est gratuite, tandis que la formule (2) convient aux usines à réservoir où l'eau stockée équivaut à l'énergie en réserve.

F. — Application numérique

Nous prendrons une turbine du barrage de Rivières-sur-Tarn qui est une installation au fil de l'eau. C'est une turbine Kaplan (H = 17 m), la vitesse relative de l'eau est élevée. Cette turbine a une puissance de 11.000 kW et produit en année moyenne (4.100 h) une énergie de 45 millions de kWh.

Nous admettrons, pour fixer les idées, une chute de puissance de 1 % au bout d'un an, chiffre qui paraît modeste. On a donc :

$$\alpha = 0{,}01$$

On admettra un prix de vente du kWh de

5 francs aux bornes de l'usine hydro-électrique et pour prix d'achat d'une roue neuve 510.000 fr. (roue usée déduite). Ce sont des ordres de grandeur de 1952.

1° CALCUL DU COEFFICIENT K :

$$K = p\,P_0\,\alpha = 5 \times 45 \times 10^6 \times 0{,}01 = 2{,}25.10^6 \text{ fr.}$$

2° COUT b DE REMPLACEMENT D'UNE ROUE :

On admettra trente heures d'arrêt, soit :

$$\frac{5 \times 45 \times 10^6 \times 30}{4.100} = 1{,}65.10^6 \text{ fr.}$$

soit au total, pour l'achat et la mise en place :

$$b = 510.000 + 1.650.000 = 2{,}16.10^6 \text{ fr.}$$

3° On trouve alors, pour période optima de remplacement de la roue :

$$T_0 = \sqrt{\frac{2 \times 2{,}16.10^6}{2{,}25.10^6}} = \sqrt{1{,}92} = 1{,}38$$

soit seize mois environ.

4° Supposons qu'on commette une erreur de 50 % en moyenne sur la période de remplacement. Ce chiffre paraît même optimiste si l'on a effectivement omis de calculer cette période.

Il en résulte une perte par an de :

$$(S_1 - S_0)\left[\frac{K}{2} - \frac{b}{S_1 S_0}\right]$$

$$= 0{,}5 \times 1{,}38\left[\frac{2{,}25.10^6}{2} - \frac{2{,}16.10^6}{1{,}5.1{,}38^2}\right] = 254.000 \text{ fr.}$$

L'énergie produite représente :

$$5 \times 45.10^6 = 225 \text{ millions de francs,}$$

d'où la perte en % du chiffre d'affaires :

$$\frac{0{,}254}{225} = 0{,}113\ \%$$

Avec une erreur de 100 % sur la période de remplacement, on aurait une perte de :

$$1{,}38\left[\frac{2{,}25.10^6}{2} - \frac{2{,}16.10^6}{2.1{,}38}\right] = 770.000 \text{ fr.}$$

par an

soit : 0,77/225 = 0,34 % du chiffre d'affaires, ce qui est important.

Si $\alpha = 0{,}02$ au lieu de 0,01 avec une erreur de 100 % sur la période de remplacement, la perte représente une fraction du chiffre d'affaires de :

$$\frac{1{,}38}{225.10^6}\left[\frac{2{,}25.10^6 \times 2}{2} - \frac{2{,}16.10^6}{2 \times 1{,}38}\right] = 1{,}03\ \%$$

Ces chiffres intéressent au premier chef le producteur d'électricité.

Pour l'économie générale du pays, il s'agit d'une perte de kWh qu'il aurait pu avoir en plus. Nous venons d'apprécier le gain financier, mais en économie réelle, la valeur des kWh perdus paraît supérieure à ces chiffres purement commerciaux que nous avons essayé d'établir.

En effet, non seulement le coût de la fabrication des roues utilisées en plus grand nombre peut se trouver abaissé, mais surtout les kilowatts récupérés procurent un gain technique qui fait boule de neige, ces kilowatts étant aussitôt employés à la production. On augmente la puissance productrice du pays. Cela est qualitativement bien supérieur au gain financier réalisé sur la vente des kilowatts, surtout à une époque de pénurie d'énergie.