



par **Stephen G. Revay**

L'article que signe Zey Emir dans le présent numéro porte sur l'application théorique et pratique des courbes d'apprentissage à la gestion de projets de construction et à l'analyse de réclamations relatives

à des pertes de productivité. Bien connues et utilisées dans le métier des chaînes de montage, on doute parfois de leur utilité dans le secteur de la construction. En principe, les travailleurs connaissent bien leur métier lorsqu'ils entreprennent un projet de construction; affirmation qui par ailleurs n'est pas aussi vraie lorsque la conjoncture économique crée une demande élevée de main-d'oeuvre et amène un flux de travailleurs moins expérimentés. Quoi qu'il en soit, lors de tout nouveau projet, les travailleurs ont besoin d'un certain temps pour apprendre à bien exécuter leurs tâches. Pour réfuter le principe des courbes d'apprentissage, certains diront que les activités de construction ne sont pas répétitives. Il est vrai que deux projets sont rarement identiques mais, dans un même projet, plusieurs tâches sont répétitives, au moins dans une certaine mesure. Quiconque exécute une même tâche ou une tâche semblable deux fois peut constater que, si tout se déroule normalement, il s'en acquitte plus rapidement la deuxième fois. Par exemple, chacun conviendra que la mise en place de la dixième dalle d'un gratte-ciel exige moins de temps que la pose de la première, même si les dalles en question ne sont pas parfaitement identiques. En 1965, l'Organisation des Nations Unies a publié le compte rendu d'une étude de grande envergure sur les effets bénéfiques de la répétition des activités dans le secteur de la construction. Le rapport montrait clairement que la répétition de tâches complexes (p. ex. érection de coffrages) donnait des gains de productivité nettement plus appréciables que la répétition de tâches simples (p. ex. décoffrage). Plusieurs chercheurs indépendants, dont les constatations ont été diffusées dans diverses publications spécialisées, ont par la suite corroboré ces conclusions. Nous-mêmes, qui avons été appelés à effectuer des contrôles de productivité dans le cadre de nombreux projets de construction, avons dressé un constat semblable. Il importe néanmoins de faire preuve de mesure : la répétition des tâches n'est pas un gage absolu de productivité accrue. De telles améliorations exigent un effort systématique et concerté de la direction.

LES COURBES D'APPRENTISSAGE DANS LE SECTEUR DE LA CONSTRUCTION

par **Zey Emir, ing., MBA**
Revay et Associés Limitée, Montréal

NOTION DE PRODUCTIVITÉ

Au sens large du terme, la «productivité» mesure le rapport entre les produits et les facteurs de production (éléments de coûts engagés). Même s'il est courant de penser que la productivité concerne exclusivement la main-d'oeuvre, elle s'applique en fait à toutes les ressources qui entrent dans un processus de production.

On n'évalue pas nécessairement les pertes de productivité en fonction d'une utilisation optimale des ressources axée sur une production maximale. Les maîtres d'oeuvre estiment fréquemment — pour des raisons pratiques — qu'un rendement maximal ne sert pas leurs intérêts. Il arrive aussi qu'ils ne peuvent fournir un tel rendement en raison de leur propres lacunes. Cependant, sans égard à l'efficacité relative avec laquelle un maître d'oeuvre prend en charge un contrat, il demeure exposé à des baisses du niveau de productivité prévu imputables au fait de tiers — et ces baisses de productivité peuvent donner droit à une indemnisation.

MESURE DES PERTES

Il est clair qu'on ne devrait pas comparer la productivité pendant une période de ralentissement ou de perturbation à une valeur théorique de rendement optimal ou quasi-optimal car il n'est pas assuré que le maître d'oeuvre offrait un tel rendement avant le ralentissement ou l'événement perturbateur. Néanmoins, on ne doit pas nier au maître d'oeuvre le droit d'exercer un recours pour le motif que des gens de métier ne fournissaient pas un plein rendement avant l'événement. Le calcul des pertes subies devrait en fait correspondre à la différence entre les heures-personnes effectivement consacrées à l'ouvrage et les heures-personnes qui auraient été nécessaires en l'absence du ralentissement ou de la perturbation.

PÉRIODE ÉTALON

Depuis les dernières années, les méthodes d'évaluation des dommages que les tribunaux et les conseils d'arbitrage favorisent le moins sont celles du coût total et du coût total modifié parce que ces dernières ne répartissent pas la responsabilité des pertes subies. En d'autres mots, on présente le montant des pertes comme la preuve d'un préjudice dont la responsabilité doit être assumée par le maître d'ouvrage. Les tribunaux tendent à appliquer des critères plus rigoureux aux maîtres d'oeuvre lorsque des poursuites en dommages sont fondées sur des évaluations hypothétiques de la productivité de base. Ces recours sont considérés comme égo-centriques et simplement subjectifs. Les tribunaux semblent privilégier des réclamations plus étroitement liées à la réalité.

La méthode de calcul que privilégient les tribunaux fait appel à une certaine forme d'analyse de cause à effet pour établir la preuve du préjudice. La preuve la plus convaincante d'une perte de productivité résulte de la comparaison des travaux exécutés pendant une période perturbée avec ceux effectués en temps normal. La meilleure base d'évaluation de la perte de productivité correspond au rendement réel obtenu lors de l'exécution d'une même tâche dans le cadre d'un même projet. Par exemple, si un changement affecte une tâche au moment où elle est exécutée à 30 %, la productivité atteinte avant le changement constitue la meilleure base d'évaluation pour établir et calculer la perte de rendement imputable au changement.

Cette méthode est celle de la «période étalon», parfois aussi appelée «méthode différentielle». Elle permet de calculer les pertes de productivité en comparant le taux de rendement atteint en temps normal à celui constaté en période de perturbation.

La méthode de la période étalon est également mieux accueillie par les maîtres d'ouvrage parce qu'elle rajuste systématiquement la productivité de base

en fonction des pratiques inefficaces attribuables au maître d'oeuvre. Elle tient compte des pertes de productivité causées par des facteurs externes et internes. C'est pourquoi on considère la période étalon comme une façon plus rigoureuse de mesurer les lacunes de rendement. Elle constitue la façon la plus objective de formuler un recours car, plutôt que d'utiliser des comparaisons fondées sur des moyennes de l'industrie, elle fait appel à des données de référence issues du projet en cause. L'évaluation quantitative des pertes de productivité est donc liée au projet lui-même et aux circonstances particulières entourant les retards subis. Cette méthode présente aussi l'avantage d'éliminer les différends quant à la validité des estimations de coûts ou aux facteurs ayant pu affecter la productivité en raison de la non-responsabilité du maître d'ouvrage. Aussi, la méthode de la période étalon demeure valide même lorsque les devis estimatifs du maître d'oeuvre manquent de réalisme.

La méthode de la période étalon est fondée sur le postulat selon lequel le rendement enregistré en temps normal aurait été maintenu pendant la période affectée par des facteurs négatifs (voire amélioré en raison de la courbe d'apprentissage) si ce n'était d'événements attribuables au maître d'ouvrage qui ont affecté la production. Le montant de la réclamation est établi en fonction de la différence entre les taux de productivité.

COURBE D'APPRENTISSAGE

Le coût de fabrication unitaire d'un produit décroît généralement en fonction du nombre d'unités produites par un groupe ou un individu. On désigne communément ce phénomène sous le nom de «courbe d'apprentissage». La courbe d'apprentissage démontre que le nombre d'heures-personnes requis pour effectuer une opération décroît avec régularité lorsque l'opération est répétée. Quand le taux d'apprentissage est linéaire, on enregistre une réduction constante des coûts de production toutes les fois qu'on double le nombre des tâches répétées. Résultat : la réduction absolue baisse avec chaque unité produite. Après un nombre considérable de répétitions, la courbe d'apprentissage tend vers un plateau correspondant au délai minimum d'exécution de la tâche.

On applique souvent la théorie des courbes d'apprentissage aux travaux de construction répétitifs et continus. Ainsi, lorsqu'un ouvrage exige l'utilisation répétée des mêmes coffrages (p. ex. gratte-ciel ou complexe immobilier), la productivité peut se prêter à une analyse fondée sur les courbes d'apprentissage. Il en est de même des travaux d'armature, de coulage de béton ou encore de pré-fabrication et de finition, tant que l'on constate une réduction relativement constante des facteurs de production requis pour fabriquer une unité à chaque dou-

Tableau A

Rapport coût unitaire/quantité pour une courbe d'apprentissage de 80%

Production cumulative	Coût unitaire
1	100
2	80
4	64
8	51
16	41

blement des quantités produites. Par exemple, une courbe d'apprentissage de 80 % correspond à une réduction de 20 % du temps qu'exige la production des unités un et deux, une autre réduction de 20 % du temps de production des unités deux et quatre, des unités quatre et huit, des unités huit et seize, etc., comme l'illustre le tableau A.

Les prévisions des besoins en main-d'oeuvre sont l'application la plus évidente des courbes d'apprentissage au secteur de la construction. L'estimation de la productivité totale moyenne en vue d'établir un prix concurrentiel pour une soumission et l'établissement d'un calendrier en fonction de la cadence prévue des travaux en sont des exemples classiques. Les courbes d'apprentissage permettent d'obtenir des estimations quantitatives plus précises des coûts et de la durée d'un projet.

Les litiges en matière de construction constituent une autre application des courbes d'apprentissage. Par exemple, ces dernières peuvent aider à déterminer les coûts d'accélération des travaux lorsqu'un maître d'oeuvre est appelé à faire des heures supplémentaires ou à mobiliser des équipes additionnelles pour exécuter un même travail. Une telle situation entraîne naturellement un accroissement des coûts de main-d'oeuvre dès lors que des équipes font du surtemps à taux majoré. Un résultat aussi important mais moins évident à première vue réside dans la perte des gains de productivité attribuables à la répétition des tâches. Autrement dit, si un même travail est exécuté par deux équipes distinctes plutôt que par une seule, chacune bénéficie de moitié moins de répétitions. En un mot, les équipes ne peuvent atteindre la capacité initialement prévue — l'effet d'assimilation des tâches s'en trouve réduit et le temps moyen requis pour produire une unité de travail augmenté.

Lorsqu'un maître d'oeuvre doit interrompre temporairement une activité, l'équipe visée peut être affectée à d'autres travaux ou mise à pied (selon la durée prévue de l'interruption). Quand le maître d'oeuvre est appelé à relancer les travaux interrompus, il peut s'avérer nécessaire de reprendre le processus d'apprentissage.

Lorsqu'un maître d'oeuvre doit exécuter des travaux supplémentaires, les coûts connexes lui sont généralement rem-

boursés à tarif majoré ou selon un prix négocié. Si les travaux en question sont très répétitifs, les unités supplémentaires peuvent être produites à un coût inférieur parce qu'en les fabriquant, le maître d'oeuvre profite encore plus des effets de la courbe d'apprentissage. Si les unités supplémentaires sont fabriquées par les mêmes équipes, le prix moyen de la soumission peut alors être trop élevé. Au contraire, si les unités supplémentaires sont fabriquées par une autre équipe, le processus d'apprentissage peut reprendre à zéro, et les frais de production des nouvelles unités se révèlent supérieurs au coût initial.

Quand les travaux supplémentaires confiés au maître d'oeuvre sont de courte durée et relativement peu répétitifs, leur exécution entraîne des coûts plus élevés. De même, lorsqu'un maître d'oeuvre doit fabriquer un grand nombre d'unités à répétition, le coût unitaire moyen des premières unités est plus élevé. Si les dernières séries d'unités sont exclues des travaux et que ces unités à plus faible coût ne sont pas produites, il devient impossible pour le maître d'oeuvre de recouvrer les coûts estimés sur la base de tarifs moyens.

CALCUL DES GAINS DE PRODUCTIVITÉ

Une courbe d'apprentissage est une représentation mathématique, graphique ou tabulaire du rapport qui existe entre le nombre de fois où un produit est fabriqué ou un service rendu et la réduction des ressources nécessaires à l'élaboration du bien ou du service en question (p. ex. heures-personnes). Voici l'expression mathématique d'une courbe d'apprentissage :

$$y = ax^n$$

Dans cette formule,

y = heures-personnes nécessaires pour produire la nième unité

a = heures-personnes nécessaires pour produire la première unité

x = nième unité

n = exposant exprimant le lien entre facteurs et pentes d'apprentissage.

Selon cette théorie, le coût unitaire décroît d'un pourcentage fixe du coût unitaire précédent toutes les fois que double le nombre d'unités produites. Ce pourcentage fixe correspond au facteur d'apprentissage. Pour les opérations machine à rythme constant, dont la production ne peut être améliorée, le facteur d'apprentissage serait de 100 %. Pour les tâches complexes exemptes de contraintes externes, le taux d'amélioration pourrait atteindre 70 %. Autrement dit, la fabrication de la deuxième unité exigerait 70 % du temps de la première, et celle de la trente-deuxième 70 % du temps de la seizième, etc.

Pour les travaux de construction, les facteurs d'apprentissage types sont de l'or-

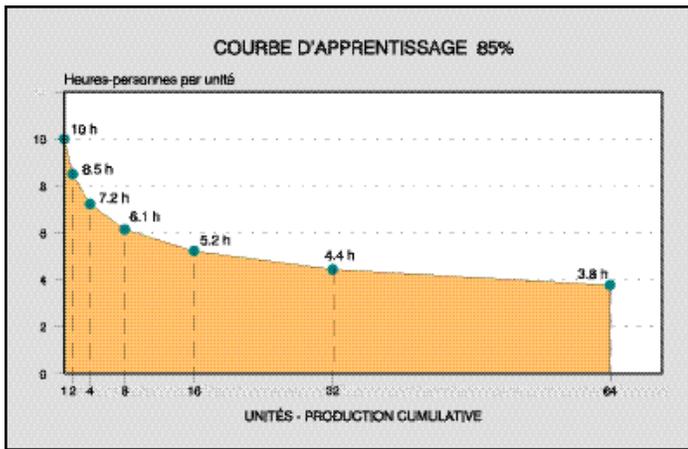


Figure 1

dre de 70 à 90 %. La figure 1 présente le rapport entre des unités et les heures-personnes correspondantes pour un facteur d'apprentissage donné, en l'occurrence 85 %.

La figure 2 illustre les conséquences d'une variation des facteurs d'apprentissage sur les heures-personnes par unité. On peut constater qu'un facteur d'apprentissage supérieur (90 %) donne une moindre amélioration qu'un facteur inférieur (80 %). L'effet des courbes d'apprentissage est donc plus manifeste quand le facteur d'apprentissage est bas.

APPLICATION DES COURBES D'APPRENTISSAGE À L'ANALYSE DES RÉCLAMATIONS

Une analyse fondée sur les courbes d'apprentissage peut se révéler très utile pour mesurer les pertes de productivité, en particulier lorsque les paramètres de rendement sont consignés tout au long du projet. Les analyses de périodes étalons devraient tenir compte de l'effet des courbes d'apprentissage. L'évaluation quantitative des dommages peut donner des résultats inadéquats si l'on compare le taux de productivité «normal» atteint lors de la production des premières unités au rendement obtenu pendant la période perturbée subséquente. Le taux de productivité de la période normale devrait être rajusté en fonction du rendement qui aurait été obtenu sans les facteurs négatifs — c.-à-d. intégrer les effets des courbes d'apprentissage avant toute comparaison avec le rendement obtenu pendant la période de difficultés.

Cela est particulièrement manifeste lorsqu'on considère qu'avec une courbe d'apprentissage de 85 %, le temps nécessaire à la fabrication de la huitième unité correspondrait à 61,5 % seulement du temps requis pour produire la première. Ainsi, si on utilisait des données relatives à la première ou à la deuxième exécution d'une tâche répétitive et qu'on tentait de prouver quelle aurait dû être la durée de la huitième exécution (sans tenir compte de la courbe d'apprentissage), on sures-

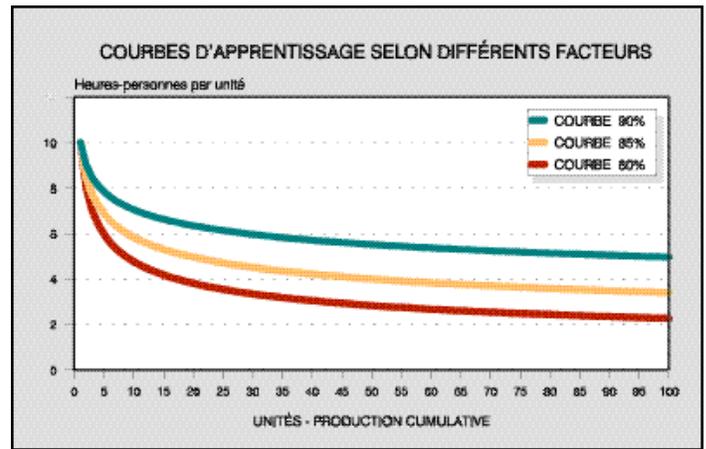


Figure 2

timerait sensiblement les coûts de la tâche, et la mesure de la perte de productivité s'en trouverait erronée.

À noter qu'une courbe d'apprentissage est une simple représentation de la baisse prévue des facteurs de production par unité, à mesure qu'augmente la production cumulative. Des archives fiables de la productivité réelle sont indispensables à un calcul utile et précis. Des données suffisantes, en qualité et en quantité, peuvent être mises à contribution pour prévoir le nombre d'heures-personnes requises en période perturbée.

EXEMPLES DE L'APPLICATION DES COURBES D'APPRENTISSAGE

Cas 1

La méthode d'analyse des courbes d'apprentissage fut appliquée à la construction d'un pont à voussoirs de béton préfabriqués. Les segments préfabriqués ont été construits dans un parc de préfabrication situé non loin du chantier, puis mis en place en porte-à-faux, solidarités et post-tendus pour former chaque travée. Chacune des deux voies du pont comptait 50 travées, et chaque travée comportait deux segments de pile posés sur des piles et dix segments types.

Les segments ou «voussoirs» ont été préfabriqués dans un moule spécial, ou «banc de bétonnage», où chaque nouveau segment était coulé contre le précédent afin d'assurer un jointement parfait. On a utilisé trois bancs de bétonnage pour le coulage des segments types et un autre pour les segments de pile. Chaque unité portait un numéro d'identification unique correspondant à sa position exacte dans l'ouvrage.

La fabrication à répétition des voussoirs constitue évidemment le principal avantage potentiel de ce procédé. Un pont long et droit ou une route surélevée est un ouvrage de rêve en termes de préfabrication car le maître d'oeuvre peut atteindre un appréciable niveau d'expertise dans un laps de temps relativement court. Dans le projet qui nous occupe, le

maître d'oeuvre a cependant été confronté à d'importants retards de préfabrication. Les ouvriers n'ont pu maîtriser rapidement la technique de coulage des voussoirs en raison de la complexité des dessins de construction ont révélé que les segments comportaient un nombre sensiblement plus élevé de câbles de précontrainte internes que la plupart des ouvrages en encorbellement. La construction des voussoirs a donc exigé beaucoup plus d'heures-personnes que prévu. De même, beaucoup plus d'heures supplémentaires que prévu ont été effectuées pour respecter les étapes du calendrier d'exécution. L'analyse de la réclamation a tenté de mettre en lumière les coûts de préfabrication unitaires additionnels engagés.

Le maître d'oeuvre avait consigné les coûts avec beaucoup de précision. Il disposait notamment de relevés de temps qui répartissaient clairement les coûts rattachés aux divers travaux (pose des barres d'armature, coulage du béton et coffrage, etc.). Heures supplémentaires et normales avaient également été consignées pour chaque corps de métier. Des équipes différentes avaient été affectées à chaque banc de bétonnage, et le maître d'oeuvre avait des relevés indiquant avec précision à quel banc tel voussoir avait été coulé.

La première étape a donc consisté à établir la production hebdomadaire type de voussoirs sur la base des données d'exécution. On a ensuite représenté graphiquement la production pour chaque groupe de 15 unités fabriquées, comme l'illustre la figure 3. On a choisi de présenter les unités par groupe de 15 parce que trois bancs de bétonnage étaient en service cinq jours sur sept.

La deuxième étape a consisté à définir une «période normale». L'analyse du graphique de productivité des segments types a révélé que le coût unitaire moyen a commencé à plafonner et à atteindre un plateau au voussoir 285, ce qui correspond à un pourcentage d'achèvement des travaux d'environ 30 %. Une fois la «période normale» précisée sur le

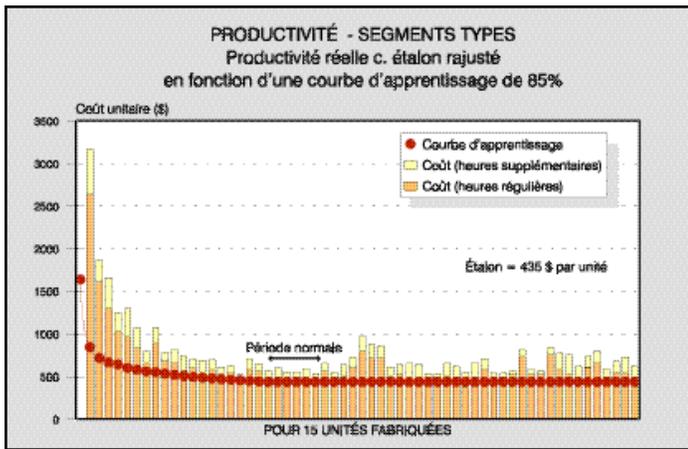


Figure 3

graphique, l'analyste doit s'assurer qu'une part suffisante des travaux a été exécutée pour démontrer la capacité du maître d'oeuvre à soutenir cette cadence à long terme. Il importe également de s'assurer que les travaux exécutés pendant la «période normale» sont représentatifs et semblables à tous égards à ceux effectués pendant la période perturbée. À titre de vérification finale, la production associée à la «période normale» doit être comparée au devis estimatif pour déterminer si cette dernière ne serait pas artificiellement élevée et à éviter les erreurs liées à un échantillonnage biaisé.

La productivité en «période normale» est alors retenue comme limite supérieure de rendement. Cette limite supérieure ou productivité normale devient le fondement d'une échelle qu'on utilise pour déterminer les facteurs de production relatifs aux premières unités (c.-à-d. leur coût unitaire) sur la base de la courbe d'apprentissage. Autrement dit, la courbe d'apprentissage du projet se fonde sur la période normale et fait l'objet d'une extrapolation sur la durée entière des travaux, qui représente la productivité de base. La courbe d'apprentissage est tracée en regard de la productivité réelle, comme l'illustre la figure 3. Toute heure réelle figurant au-dessus de la ligne de base représente une perte de productivité s'ajoutant aux éventuelles pratiques inefficaces imputables au maître d'oeuvre.

La perte de productivité cumulative pour le projet correspond à l'écart entre le coût cumulatif réel et le coût réalisable, ainsi que l'illustre la figure 4.

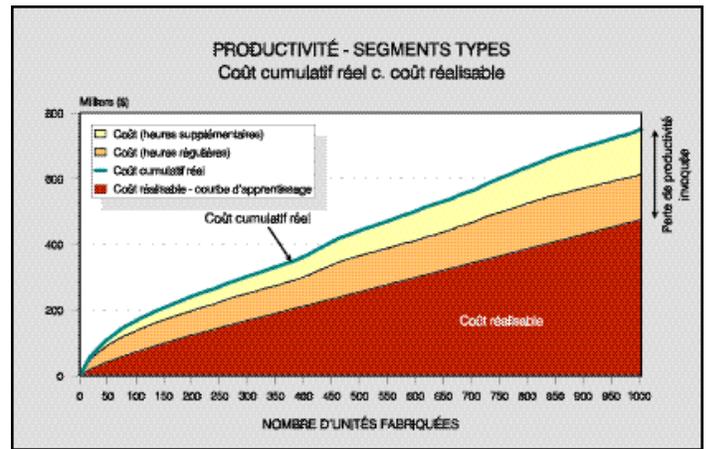


Figure 4

Cas 2

Un autre exemple d'application des courbes d'apprentissage est celui d'un sous-traitant spécialisé en cloisons sèches, qui a accusé des retards et supporté des frais additionnels par suite de chevauchements et de problèmes de conception mécanique et électrique. La première étape a alors consisté à établir la productivité réelle du sous-traitant pour les travaux d'installation exécutés pendant la durée entière du projet. À cette fin, on a évalué la productivité du sous-traitant en établissant le rapport des facteurs de production réels (heures-personnes) à la cadence d'exécution (soit la part de main-d'oeuvre dans le pourcentage des travaux achevés).

À l'étape suivante, on a défini la période non perturbée ou la moins affectée. L'historique des travaux indiquait qu'au cours des six premiers mois (premier trimestre) du projet, les équipes étaient constamment déplacées en raison d'une incapacité d'accéder aux aires de travail. On procédait alors concurremment à une reprise de la conception des systèmes mécaniques et électriques. Une fois ces systèmes reconfigurés, la fabrication de composantes additionnelles ou modifiées a de nouveau différé l'installation, qui a dû se poursuivre pendant une bonne partie du deuxième trimestre. Le troisième trimestre a été désigné «période normale», au cours de laquelle un minimum de chevauchement a entravé la pose des cloisons. On a retenu comme productivité normale ou valeur étalon le niveau de productivité que le sous-trai-

tant aurait pu soutenir dans des circonstances normales pendant la durée complète du projet.

Les heures-personnes cumulatives réelles nécessaires à l'achèvement de l'ensemble du projet furent calculées d'après la valeur étalon (productivité réalisable du sous-traitant) rajustée en fonction de la courbe d'apprentissage, alors que la limite supérieure de rendement était atteinte à 33% de l'exécution du projet. Ce taux a été retenu comme stade auquel le sous-traitant avait accompli suffisamment de travail pour atteindre un plateau sur la courbe d'apprentissage.

La perte de productivité totale correspondait à la différence entre les heures-personnes cumulatives réelles et les heures-personnes cumulatives réalisables.

CONCLUSION

Tant les tribunaux que les conseils d'arbitrage reconnaissent l'utilité des courbes d'apprentissage pour apporter des ajustements équitables lors de différends relatifs à des pertes de productivité. La théorie des courbes d'apprentissage est fondée sur le principe selon lequel la rapidité d'assimilation des tâches répétitives faisant largement appel à la main-d'oeuvre tend à augmenter avec le nombre d'unités produites. Les gains réalisés plafonnent en général lorsque la productivité normale atteint la limite supérieure de rendement.