

NOM :	LES BOITES DE VITESSES MECANQUES	Page 1
NOM :	LES BOITES DE VITESSES MECANQUES	Page 1

### LE CHOIX DES RAPPORTS

Le nombre et l'étagement des rapports est directement lié aux caractéristiques du moteur, essentiellement en ce qui concerne la réserve de couple et la plage d'utilisation qui s'étend du régime de couple maximal jusqu'au régime de puissance maximale.



FIG 12

Le rapport de démultiplication de chaque vitesse doit permettre de travailler aussi fréquemment que possible dans la zone de consommation minimale du moteur.

Les vitesses d'avancement au travail sont fonction des outils et des façons culturelles propres à chaque région, pays ou communauté.

L'étagement des rapports d'une boîte de vitesses devrait permettre de disposer, pour chaque vitesse de déplacement, de la possibilité de disposer soit du couple maximal du moteur soit de sa puissance maximale.

## LE CHOIX DES RAPPORTS

Les vitesses d'avancement auxquelles s'effectuent les principaux travaux agricoles constituent une première base d'étude afin de situer le rapport de démultiplication à attribuer aux différentes vitesses.

## GRAPHIQUE DES VITESSES D'EXECUTION DES PRINCIPAUX TRAVAUX AGRICOLES

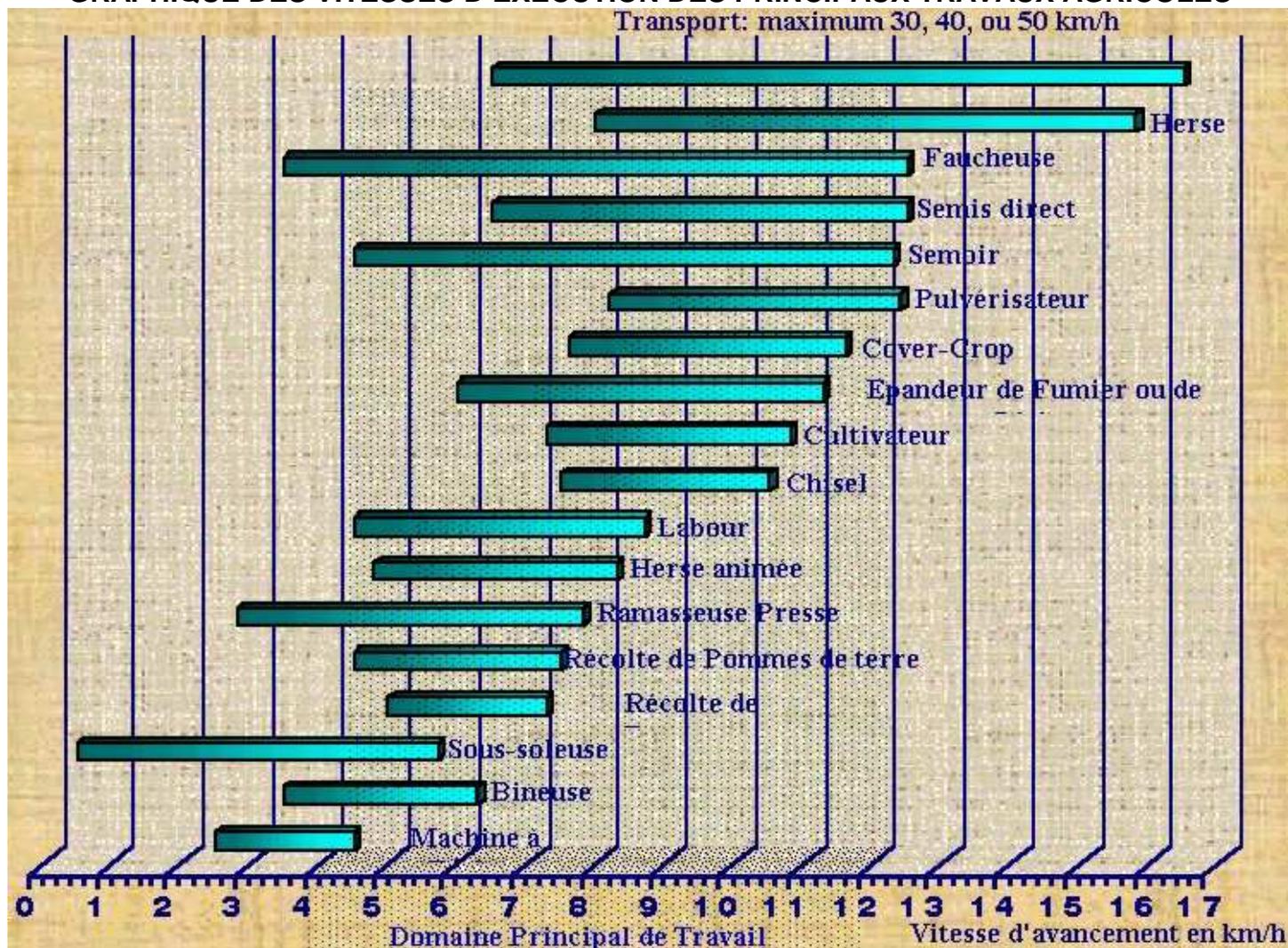


FIG 13

En fonction de ces critères, on évite par exemple, pour un travail déterminé, de placer dans sa plage de vitesse d'avancement, un changement de gamme mécanique qui nécessite la manipulation de plusieurs leviers.

En Europe, la densité des rapports doit tenir compte du fait que **70% du temps de travail** d'un tracteur est effectué à une vitesse de déplacement comprise **entre 4 et 12 km/h**, environ 25% entre 12 km/h et la vitesse maximale permise sur route (30/40 km/h).

La vitesse maximale à laquelle peut se déplacer un tracteur sur la route n'est pas la même dans tous les pays d'Europe.

Pour conduire un tracteur, il faut avoir 18 ans.

Seuls: Les exploitants agricoles, les "cuma", les "eta" ainsi que leurs salariés sont dispensés du permis de conduire équivalent au poids total roulant de l'attelage.

## LE RAPPORT DE PROGRESSION ARITHMETIQUE

L'échelonnement des vitesses est réalisé suivant une progression arithmétique lorsque chaque rapport est égal au précédent augmenté d'un nombre constant.

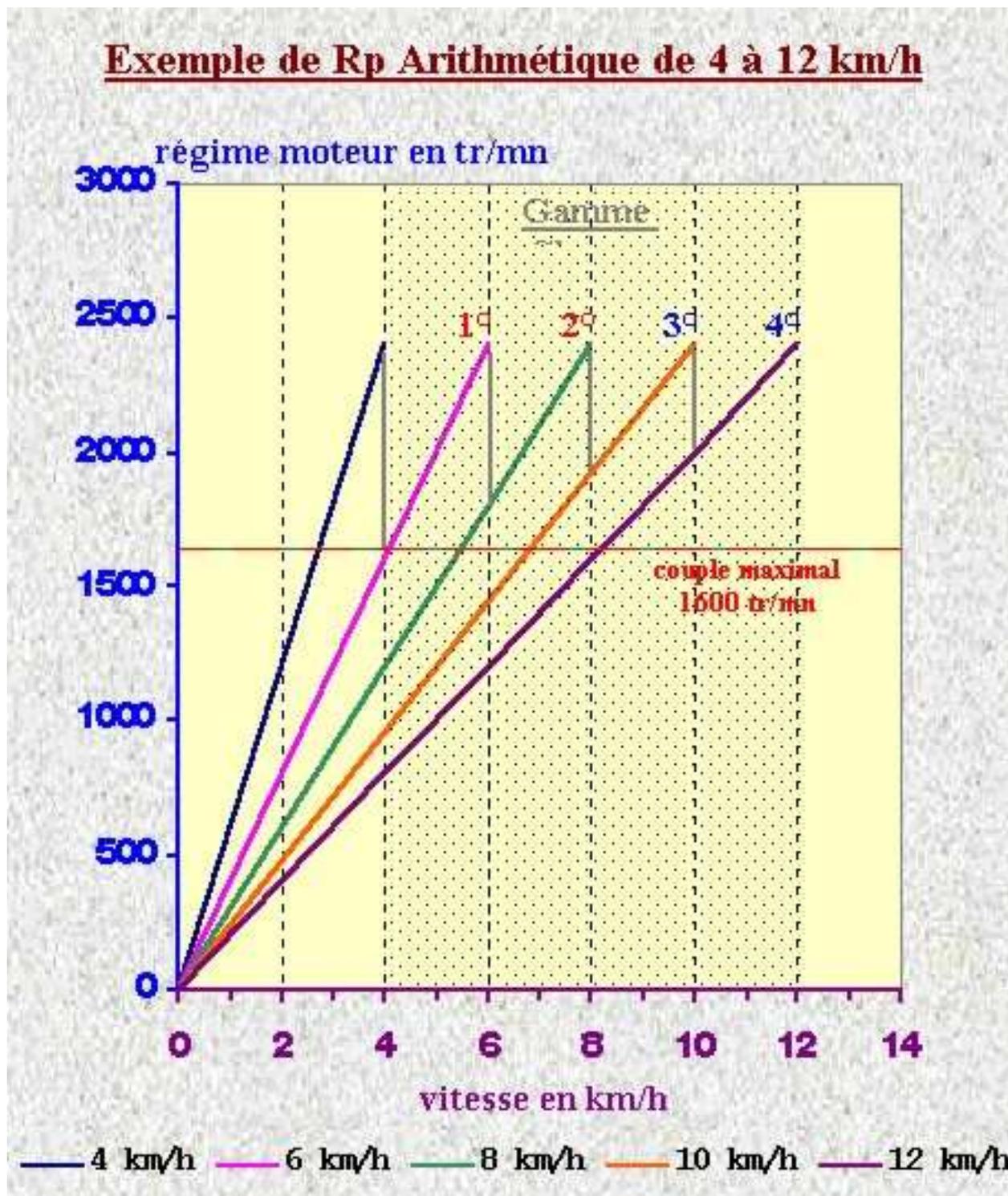


FIG 14

$$Rpa = \frac{V \text{ maxi} - V \text{ mini}}{n - 1}$$

Rpa : RAPPORT DE PROGRESSION ARITHMETIQUE

V maxi : : vitesse d'avancement maximale

V mini: vitesse d'avancement minimale

n- 1 : nombre de rapports

Le choix d'un échelonnement des vitesses selon une progression arithmétique permet d'obtenir une répartition des vitesses pour lesquelles la différence de vitesse entre chacune d'elles est une constante, cette solution nécessite un nombre de rapports élevés.

#### LE RAPPORT DE PROGRESSION ARITHMETIQUE

Selon de l'utilisation de l'engin, les constructeurs se guident par rapport à un diagramme de décision qui fixe en fonction de la vitesse d'avancement, un rapport de progression minimal ainsi qu'une limite maximale au delà de laquelle on risque de percevoir un "trou" entre deux rapports consécutifs.

Lorsque l'on représente graphiquement l'étagement des rapports d'une boîte de vitesses existante on constate que les constructeurs s'écartent parfois de ce qui constitue une première base de calculs ébauchée par le diagramme de décision.

#### LE RAPPORT DE PROGRESSION GEOMETRIQUE

Le choix d'un échelonnement des vitesses est réalisé suivant une progression géométrique lorsque chaque rapport est tel qu'il est égal au précédent multiplié par un nombre constant. Le coefficient par lequel il faut multiplier la vitesse en 1<sup>o</sup> pour obtenir le 2<sup>o</sup> rapport est le rapport de progression géométrique.

#### Diagramme de décision de 4 à 12 km/h Rapport de progression arithmétique

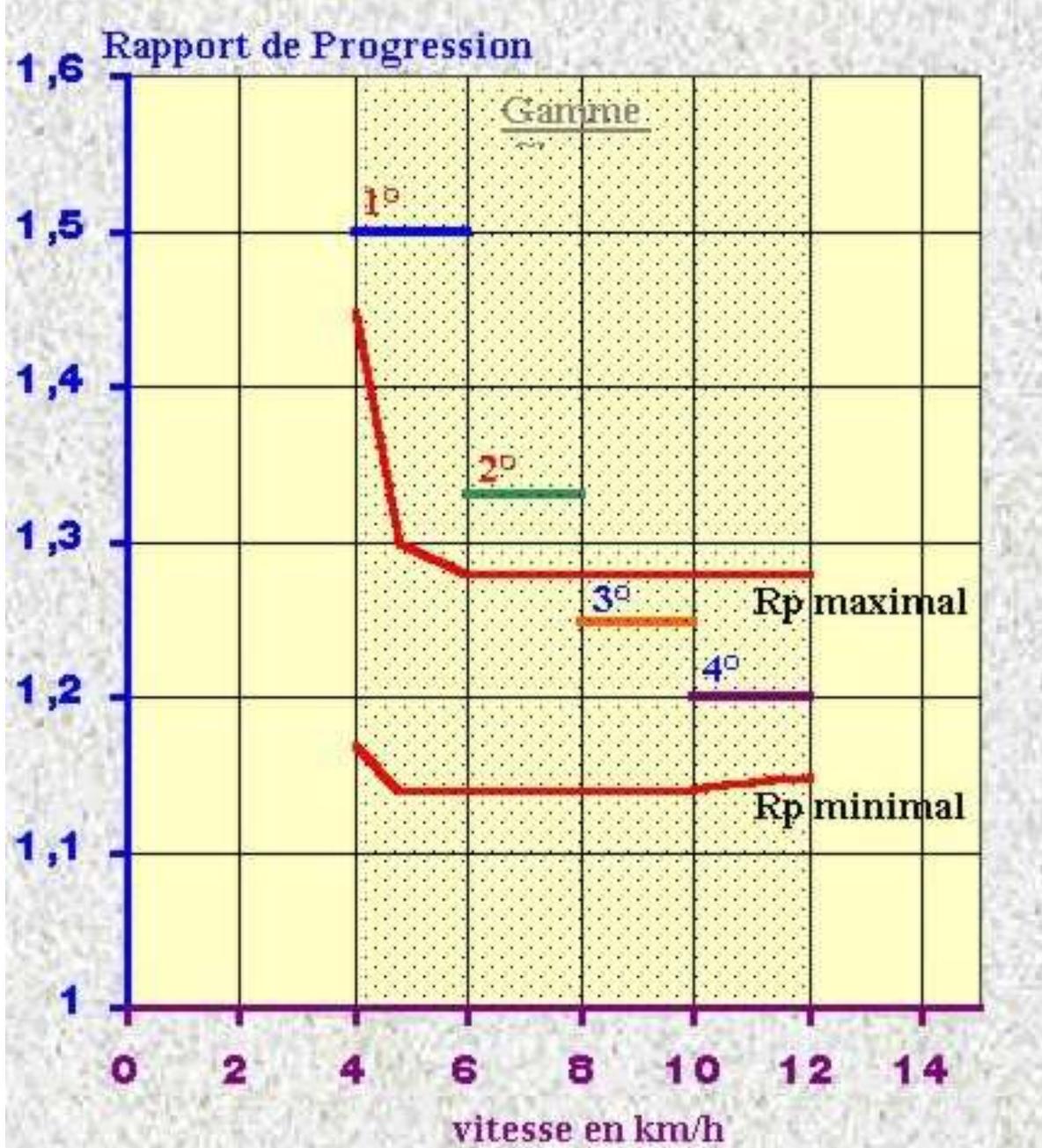


FIG 15

### LE RAPPORT DE PROGRESSION GEOMETRIQUE

Dans la pratique le rapport de progression n'est pas géométrique sur toute la plage des vitesses (de 0 à 30, 40 ou 50km/h), mais il l'est parfois à l'intérieur d'une même gamme.

## Rapport de progression Géométrique de 4 à 12 km/h

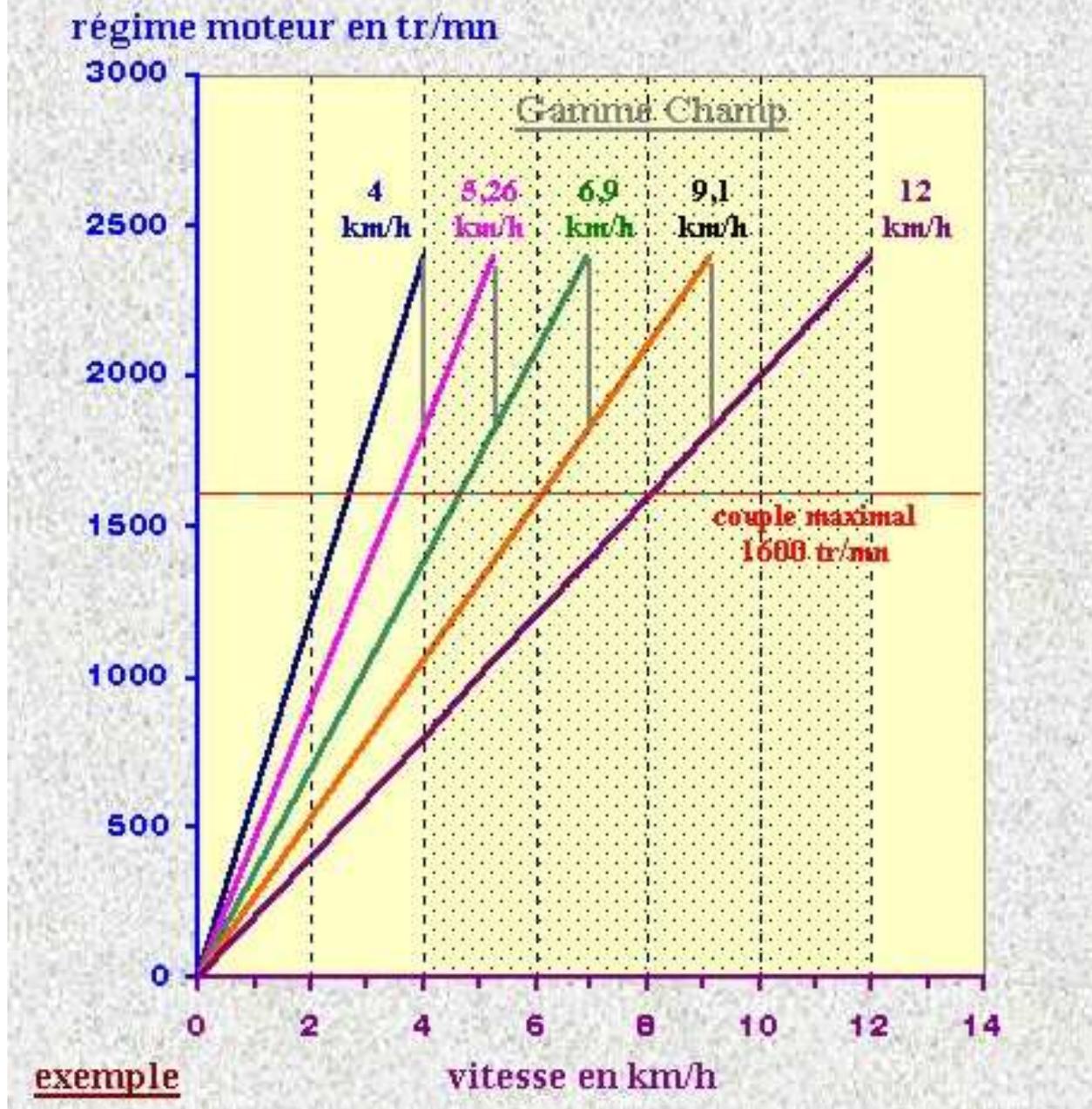


FIG 16

Un rapport de progression géométrique (ou approchant) est généralement utilisé sur les engins destinés à engendrer un effort de traction: camions routiers, tracteurs agricoles, engins de travaux publics ...

Si l'on considère deux rapports de Vitesses successifs par exemple  $1^0$  et  $2^0$ , ils permettent d'atteindre, au régime nominal du moteur respectivement 4 et 5,26 km/h grâce à une démultiplication différente entre le moteur et les roues.

Le coefficient par lequel il faut multiplier la vitesse en 10 pour obtenir le 20 rapport est le rapport de progression géométrique:

$$R_{pg} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{5,26}{4} = 1,315$$

**LE RAPPORT DE PROGRESSION GEOMETRIQUE**

Le rapport de progression, c'est à dire la raison est déterminé comme suit:

$$R_{pg} = \sqrt[n-1]{\frac{V_{maxi}}{V_{mini}}}$$

**n** : nombre de rapports  
**V** : vitesse d'avancement

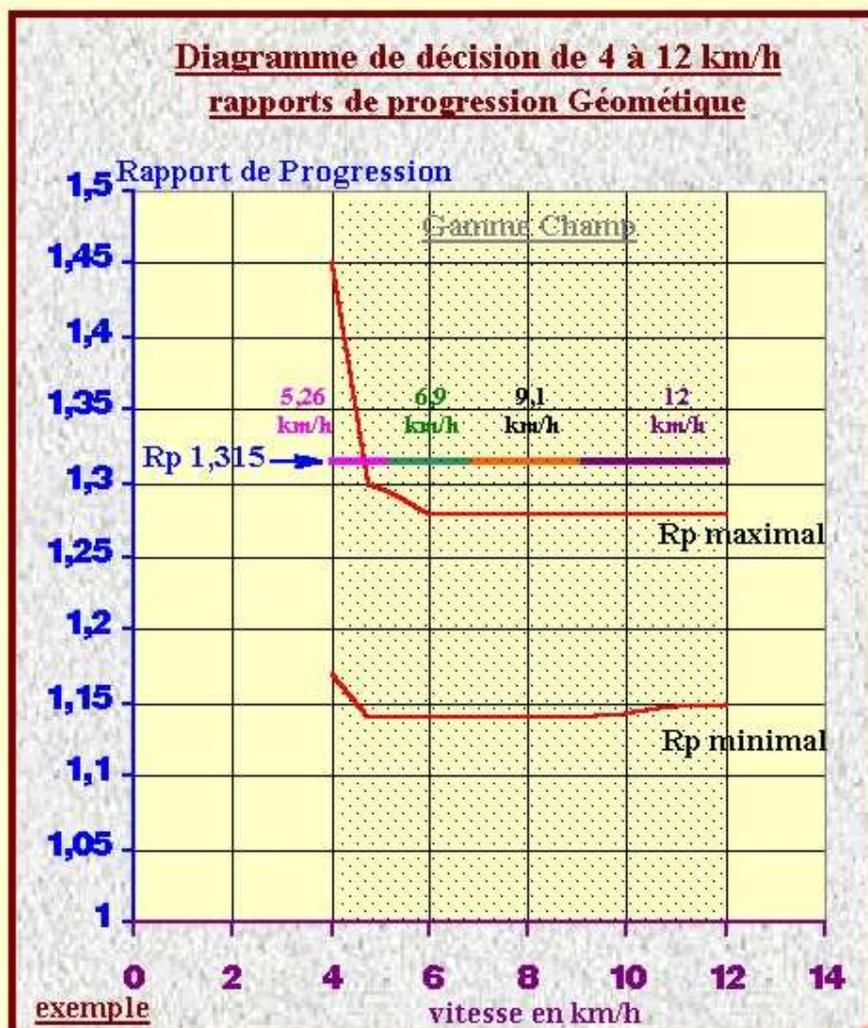


FIG 17

Le coefficient par lequel il faut multiplier la vitesse maximale atteinte par un rapport pour obtenir la vitesse atteinte par le suivant constitue le rapport géométrique.

$$R_{pg} = \frac{V_{maxi} \text{ en } 2^{ème}}{V_{maxi} \text{ en } 1^{ème}}$$

Les engins de traction qui nous concernent, utilisent souvent des rapports de progression géométriques.

## LA MOYENNE DES PROGRESSIONS

Dans certaines conditions , les constructeurs optent pour un point de référence qui est la moyenne des progressions arithmétique et géométrique.

$$R_{pm} = \frac{R_{pa} + R_{pg}}{2}$$

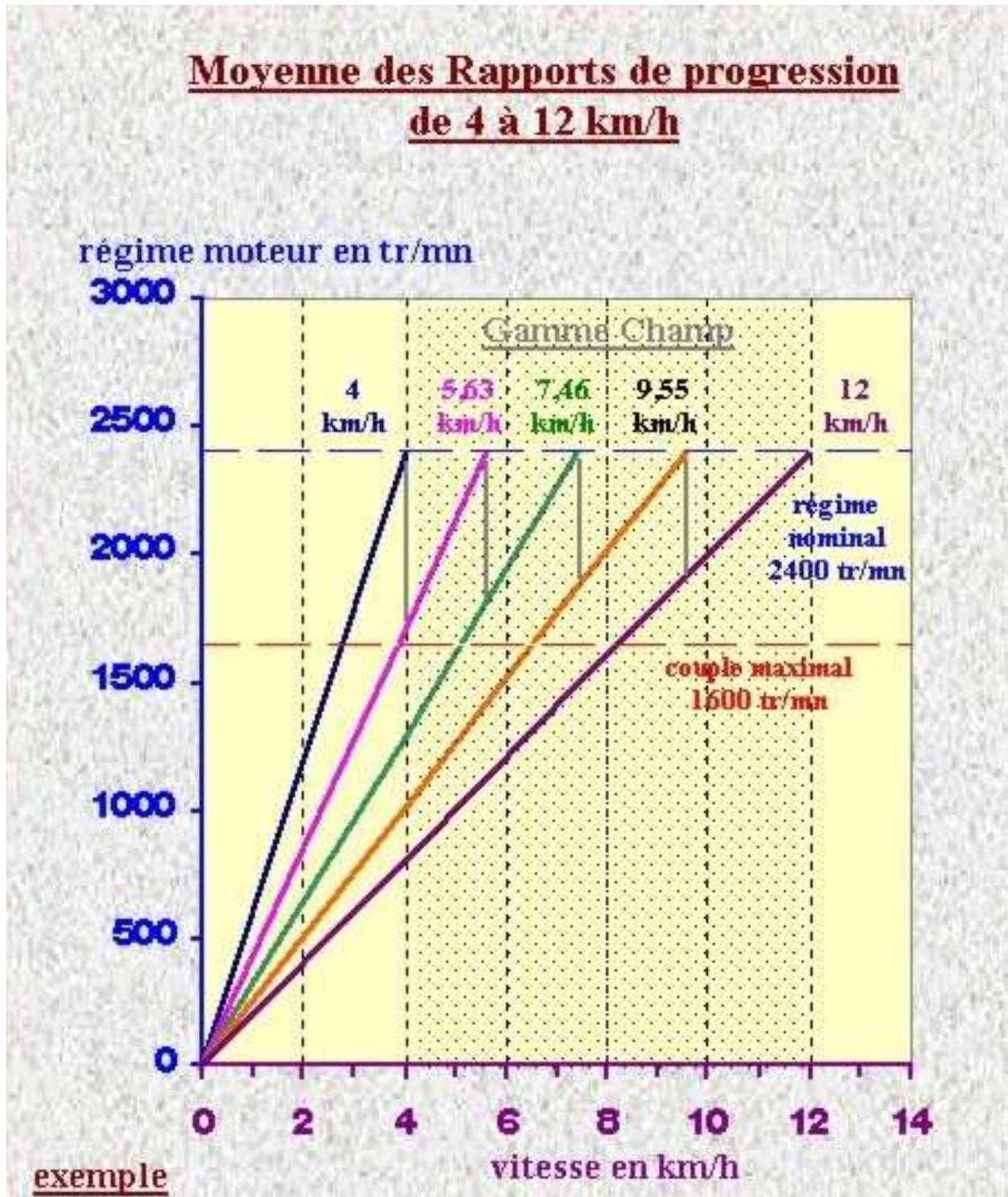


FIG 18

Le choix final tient compte de l'expérience, d'essais pratiques et de l'orientation que l'on désire donner à la destination de l'engin.

Sur un engin de traction qui comporte un nombre de rapports très important parce qu'il est prévu pour effectuer des travaux très diversifiés, les constructeurs sont obligés de panacher les solutions.

Suivant la gamme de vitesse utilisée les rapports pourront avoir une progression arithmétique, géométrique ou bien moyenne.

**CRITERES DE DECISION**

**En fonction de la vitesse d'avancement, les courbes des rapports de progression (minimales et maximales) délimitent une surface à l'intérieur de laquelle devraient se situer les vitesses.**

**Déterminer les rapports de progression fait intervenir un certain nombre de paramètres qui peuvent être le résultat du calcul et de l'expérience.**

**Le résultat doit être un bon étagement des rapports adaptés au type de matériel que l'on désire concevoir: tracteur, moissonneuse batteuse, ensileuse...**

**Dans le cas plus spécifique du tracteur agricole qui doit être polyvalent, le constructeur se garde la possibilité de privilégier, par exemple, le travail à la prise de puissance, l'aptitude au transport, ou au contraire le travail à vitesse très lente.**

**La vitesse moyenne, de 4 à 12 km/h, à laquelle on réalise les travaux agricoles est issue de statistiques qui peuvent valoir à quelques variantes près pour l'ensemble des pays**

Européens.

## Diagramme de décision de 4 à 12 km/h Moyenne des rapports de progression

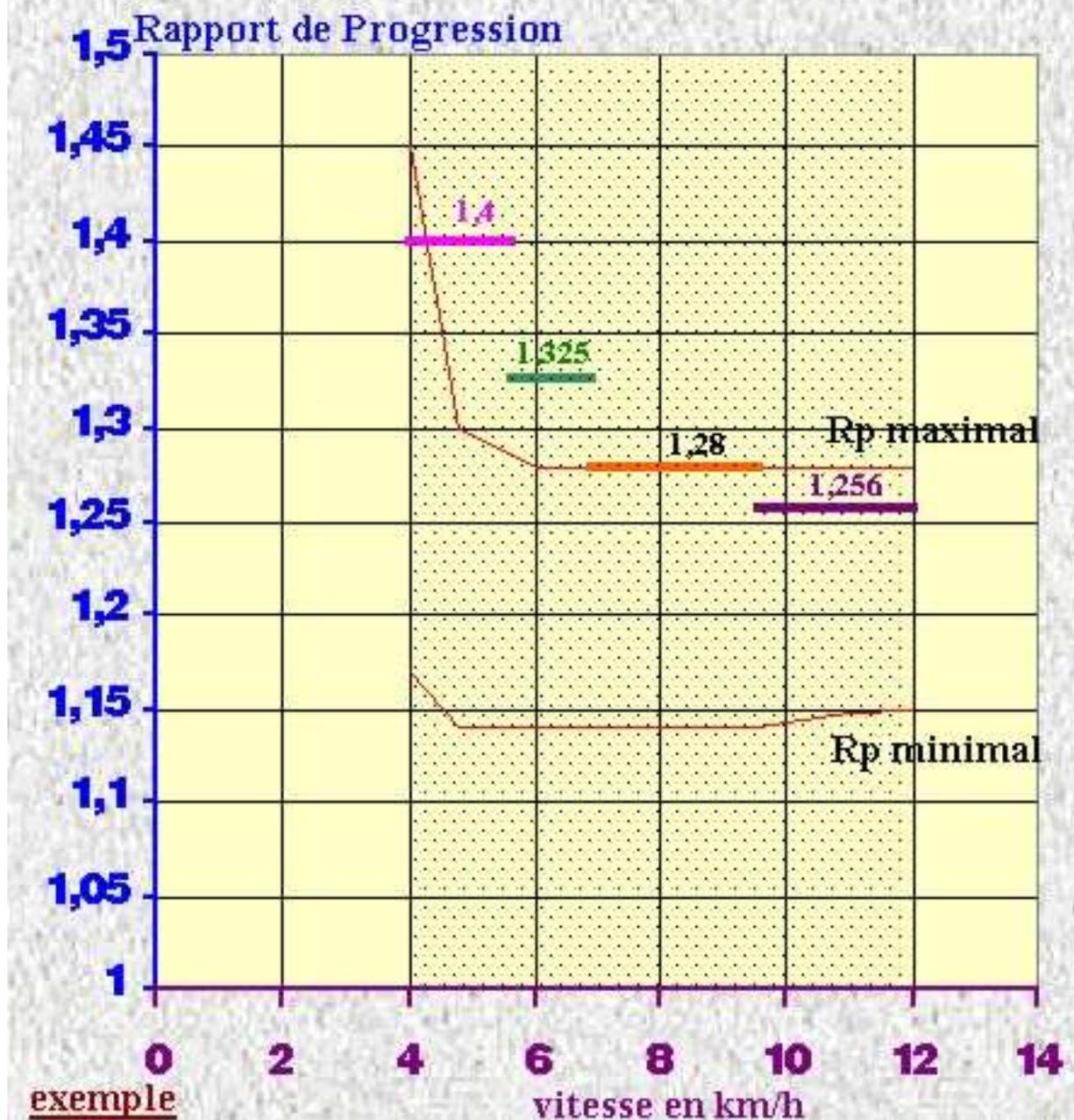


Fig 19

Cette plage de vitesse tient compte des façons culturelles, de l'évolution des matériels, de leur potentialité et des possibilités physiques d'évolution des attelages sur des terrains souvent accidentés.

Le rapport de progression choisi entre deux vitesses consécutives dépend des caractéristiques du moteur et en particulier, dans une mesure tout à fait relative, de sa réserve de couple.

Une réserve de couple élevée permet une légère augmentation du rapport de progression.

Le rapport de progression ne doit cependant pas être trop important, surtout pour les vitesses correspondant aux déplacements sur route, de manière à permettre le recouvrement partiel des rapports.

Lors du passage au rapport supérieur, il faut disposer d'une certaine réserve de couple car la vitesse d'avancement diminue le temps que soit effectuée la manœuvre.

**CRITERES DE DECISION**

Une première approche des rapports de progression à adopter peut être réalisée grâce au diagramme de décision.

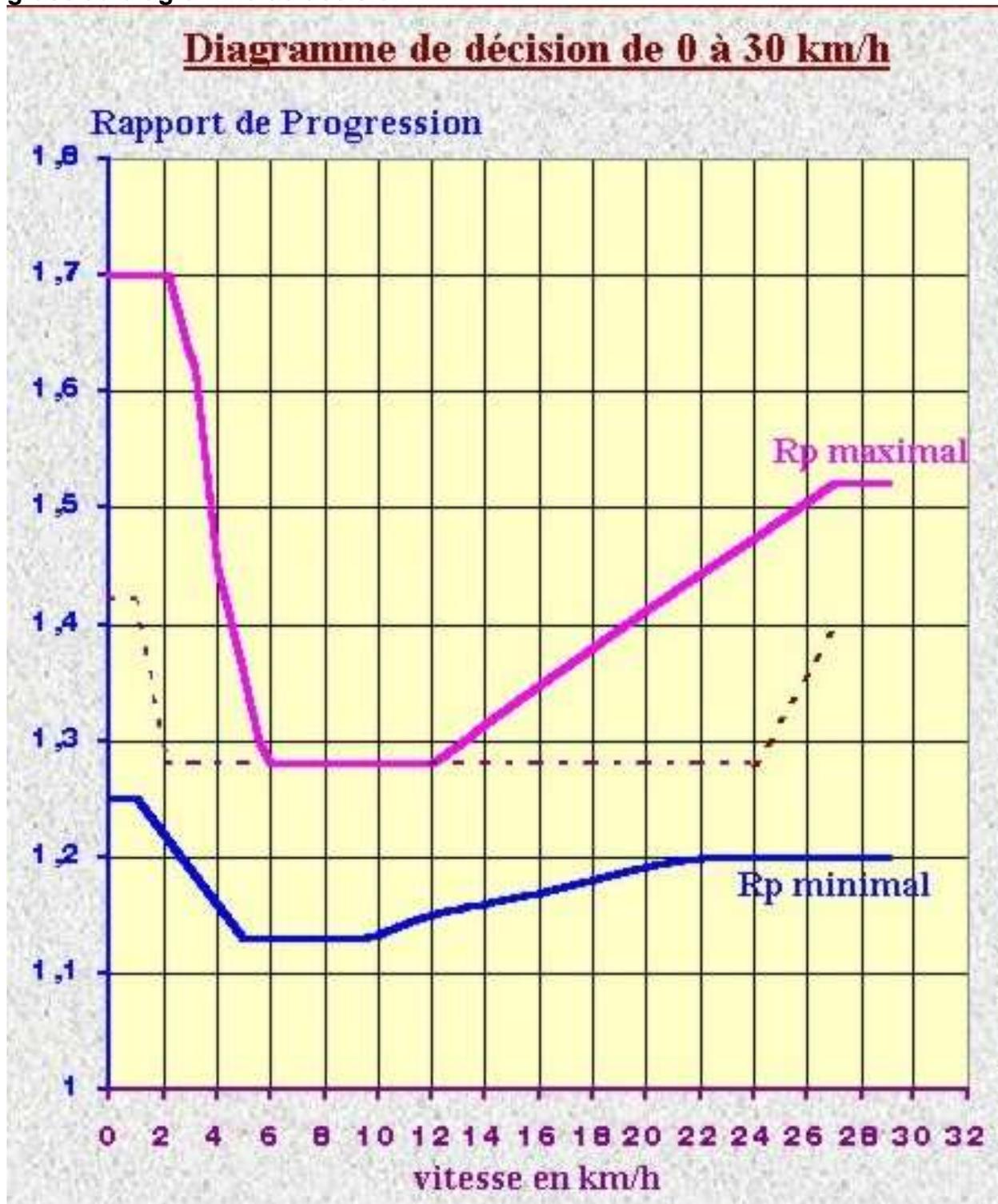


Fig 20

On porte en abscisses la vitesse d'avancement et en ordonnées le rapport de progression. Deux courbes délimitent la surface à l'intérieur de laquelle il est raisonnable de choisir le rapport de progression qui correspond à la vitesse de déplacement. La courbe limite supérieure interdit de choisir un rapport de progression trop élevé, la courbe inférieure fixe le seuil en deçà duquel on ne différencie plus les rapports. Un rapport de progression trop faible augmente le coût de fabrication car il multiplie le nombre de trains de pignons nécessaires; de plus il est inopérant car le conducteur ne peut plus faire la différence entre deux vitesses consécutives.

En revanche, si le rapport de progression est trop élevé on constate un "trou" caractéristique entre deux vitesses consécutives qui montre bien qu'un recouplement déterminé en fonction de la réserve de couple du moteur est nécessaire. Il est souhaitable d'éviter un changement de gamme entre 4 et 12 km/h nécessitant la manipulation consécutive de deux leviers de vitesses.

### CRITERES DE DECISION

Entre 0 et 4 km/h:

La surface est étendue donc les possibilités sont importantes.

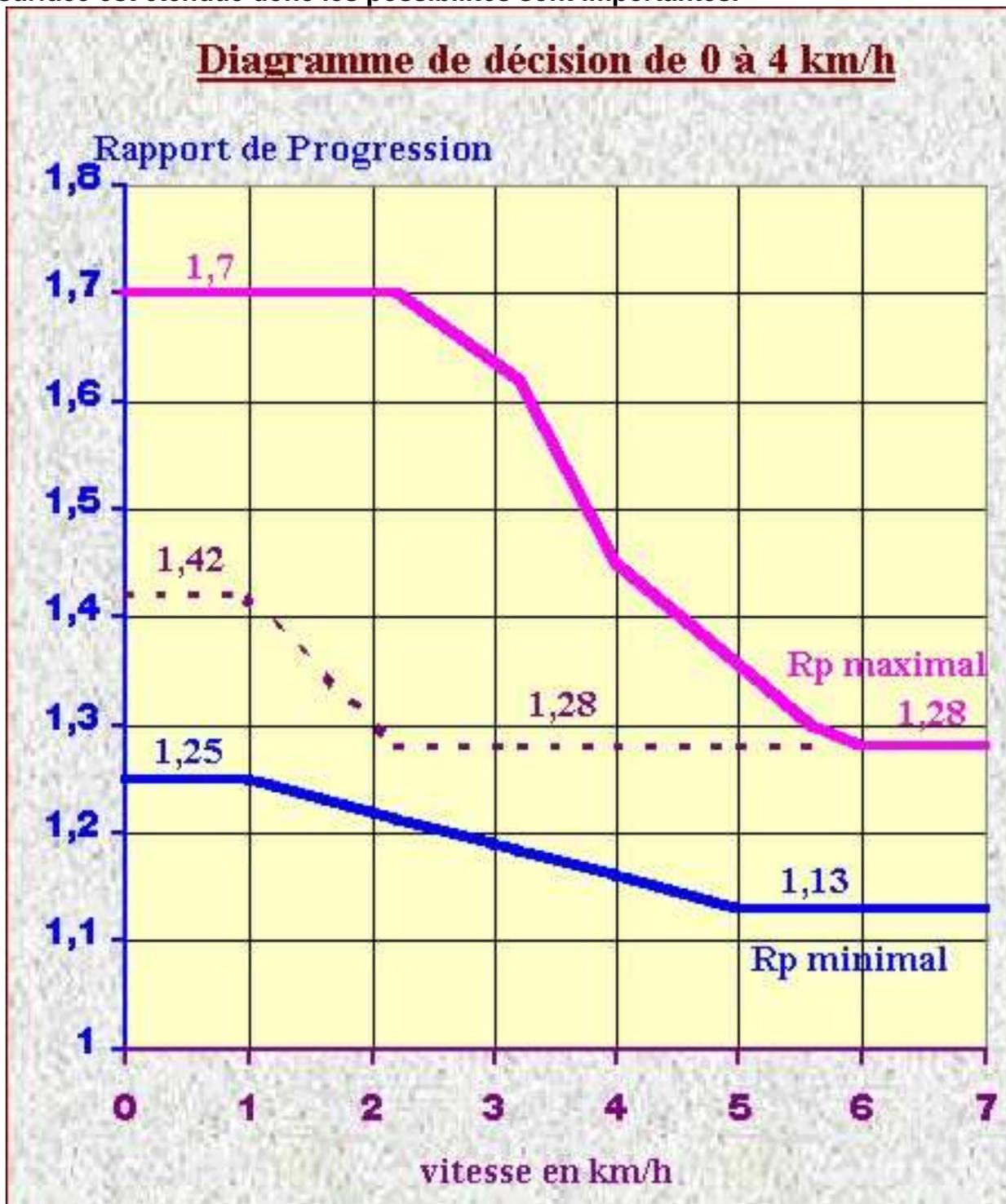


Fig 21

Le choix est à l'initiative du constructeur; toutefois, dans le cas d'utilisation d'outils animés par la prise de puissance, le régime de rotation du moteur doit être constant pour conserver le régime de rotation normalisé de la prise de puissance. Pour le travail à la prise de puissance la limite supérieure du rapport de progression est abaissée à environ 1,42 de manière à pouvoir ajuster la vitesse

d'avancement en jouant sur un nombre de rapports plus élevés sans avoir à modifier le régime de rotation du moteur.

Entre 4 et 12 km/h:

Les rapports de progression laissent une marge de choix beaucoup plus étroite étant donné la densité des travaux à réaliser dans cette zone.

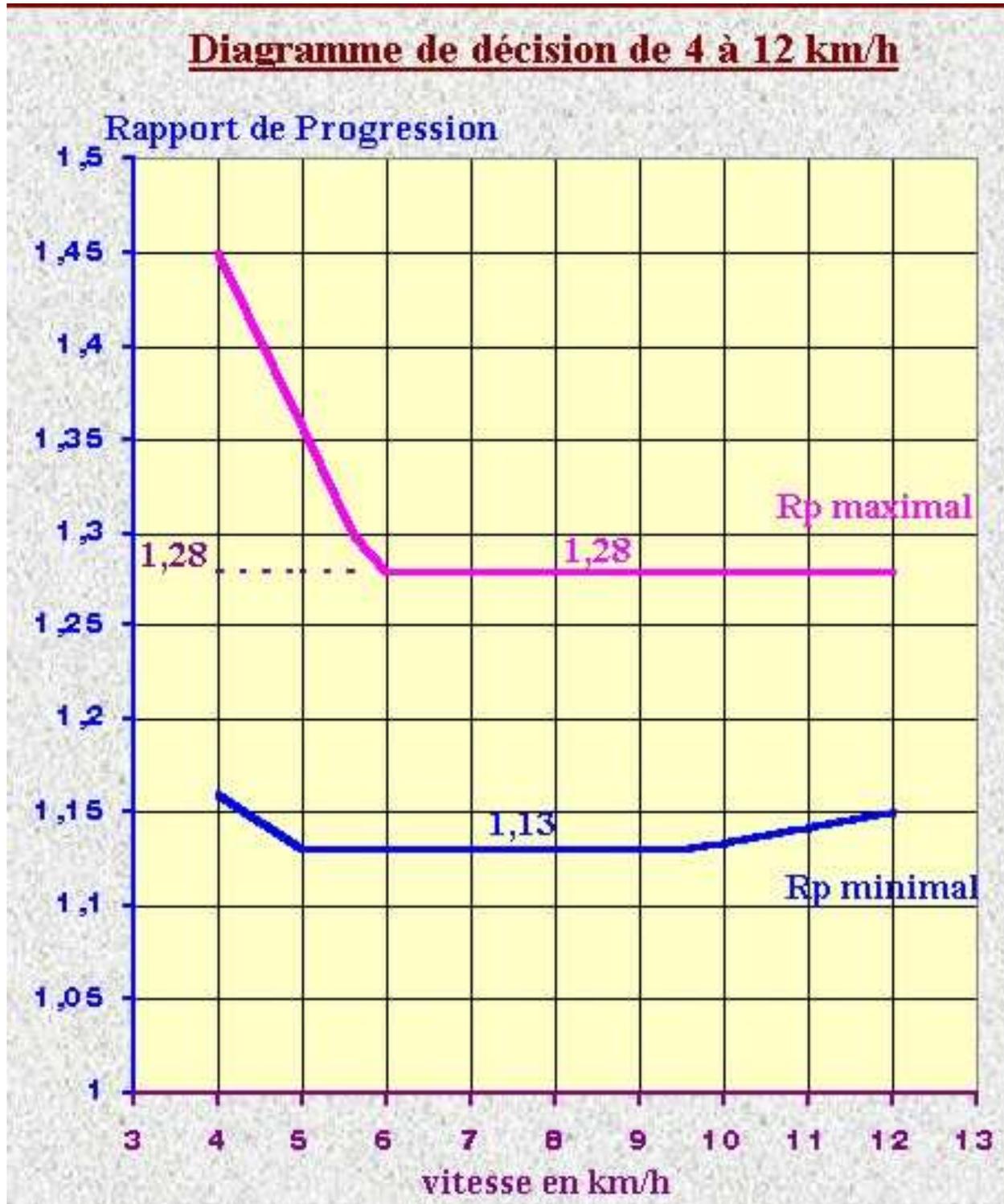


Fig 21

La limite supérieure fixée à 1,28 correspond à des moteurs ayant une bonne réserve de couple, cette limite peut être abaissée jusqu'à 1,15.

La limite inférieure fixée à 1,13 est la valeur minimale en dessous de laquelle on ne différencie plus les rapports.

De 12 km/h à la vitesse maximale autorisée sur route:

le rapport de progression dépend des aptitudes que l'on désire donner au tracteur pour effectuer du transport.

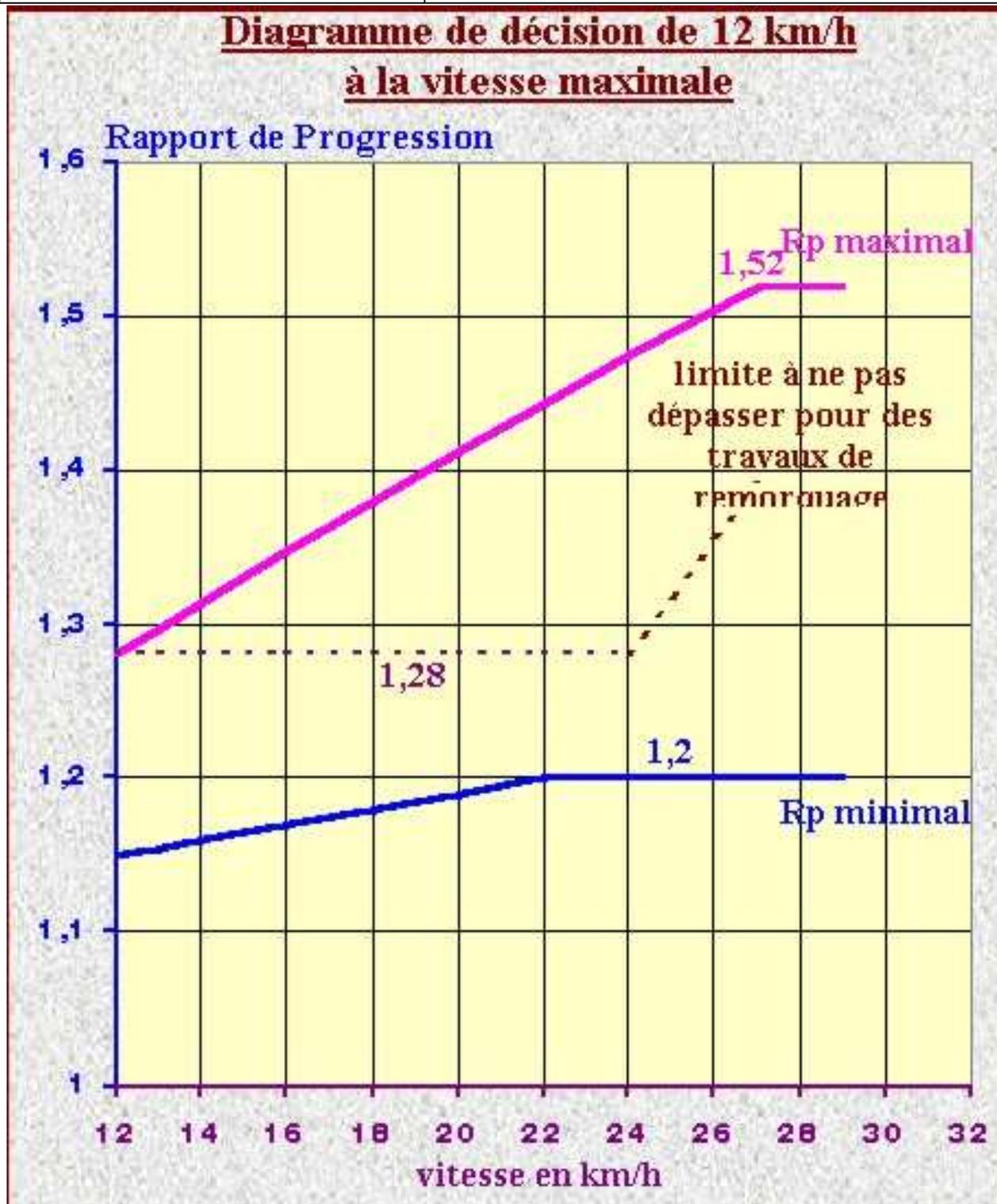


Fig 23

Si le tracteur est pressenti pour effectuer du remorquage, la courbe limite supérieure dont le rapport de progression se situe à environ 1,28 sera, au moins, prolongée jusqu'à 20 km/h de manière à disposer d'une importante réserve de couple entre chaque rapport.

Au delà, l'attelage lancé commence à disposer d'une inertie suffisante qui permet d'augmenter le rapport de progression.

Les critères de décision peuvent être matérialisés sur des courbes ou des diagrammes qui permettent de savoir, d'un seul coup d'œil, si la progression entre deux vitesses aura à la conduite trop ou trop peu d'effet:

- si c'est trop, le moteur cale presque lorsque l'on passe à la vitesse supérieure;
- si c'est pas assez, le conducteur n'a pas l'impression d'avoir changé de vitesse.

## LA PLAGE D'UTILISATION DU MOTEUR

En ce qui concerne l'étagement des rapports, la plage d'utilisation du moteur est déterminante, elle doit être aussi étendue que possible (environ 1000 tr/mn), et liée à une réserve de couple d'environ 20%.

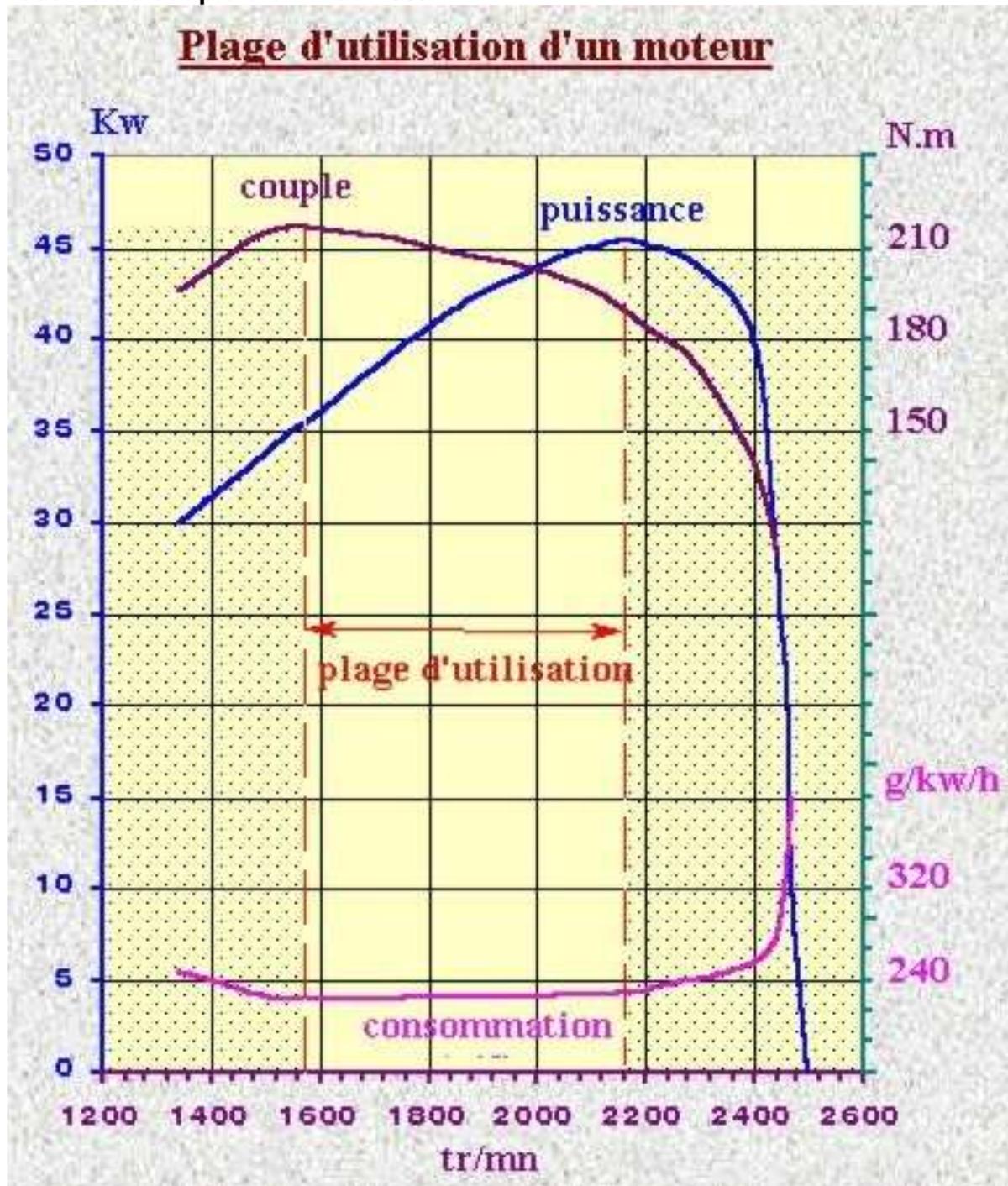


FIG 24

Les limites théoriques qui fixent la plage d'utilisation du moteur sont constituées par le régime du couple maximal en deçà duquel le moteur risque de caler si le couple résistant augmente et par le régime nominal (ou de puissance maximale) au delà duquel on se situe dans la zone de coupure du régulateur de la pompe d'injection là, d'une part la puissance diminue et d'autre part la consommation augmente dans des proportions prohibitives.

Les différents rapports de vitesse doivent être judicieusement choisis afin de permettre la meilleure exploitation possible de la plage d'utilisation du moteur (celle-ci étant relativement étroite).

**Une boîte de vitesses est intimement liée à un moteur, la conception et l'étagement de la boîte est directement liée aux performances du moteur: plus le régime de couple maximal est à un régime bas de rotation et plus la plage d'utilisation du moteur est étendue.**

**Bien plus que le pourcentage de réserve de couple si souvent cité, c'est la valeur du couple maximal lié à une consommation spécifique minimale sur toute la plage d'utilisation du moteur qui a de l'importance...**

## EXEMPLES D'ECHELONNEMENT DES VITESSES

La boîte de vitesses mécanique est essentiellement un adaptateur de couple; elle est dite à "rapports discrets" par opposition aux transmissions à variation continue du rapport de transmission (comme le variateur mécanique à courroie ou la transmission hydrostatique).

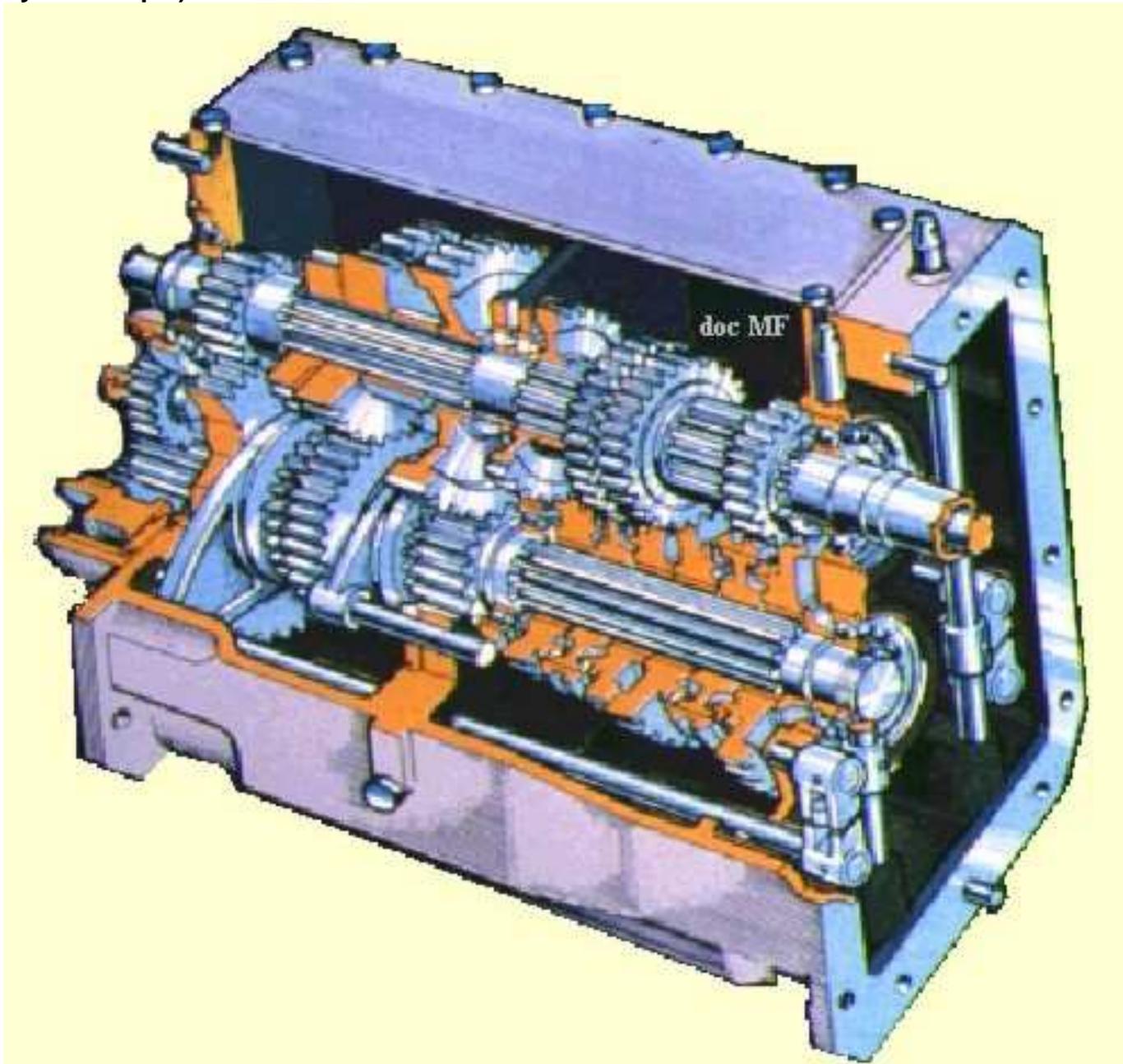


FIG 25

La boîte de vitesses doit comporter un nombre suffisant de rapports de manière à ce que la discontinuité qui la caractérise soit aussi atténuée que possible (l'antagonisme faisant que l'on recherche par ailleurs à limiter le nombre de rapports de manière à diminuer les coûts de fabrication).

Le changement de gamme qui oblige à agir sur plusieurs leviers de commande est absolument à proscrire dans la plage des vitesses d'avancement d'un travail déterminé.

EXEMPLE D'ECHELONNEMENT DES VITESSES

Particulièrement utile pour les travaux en gamme champ, certaines boîtes de vitesses sont dotées d'un ampli-couple semi-automatique. Ce dispositif permet de doubler le nombre de vitesses et assure pour chacune d'elle un changement de rapport sous charge, il assure une bonne couverture de la plage de vitesses destinée aux travaux agricoles.

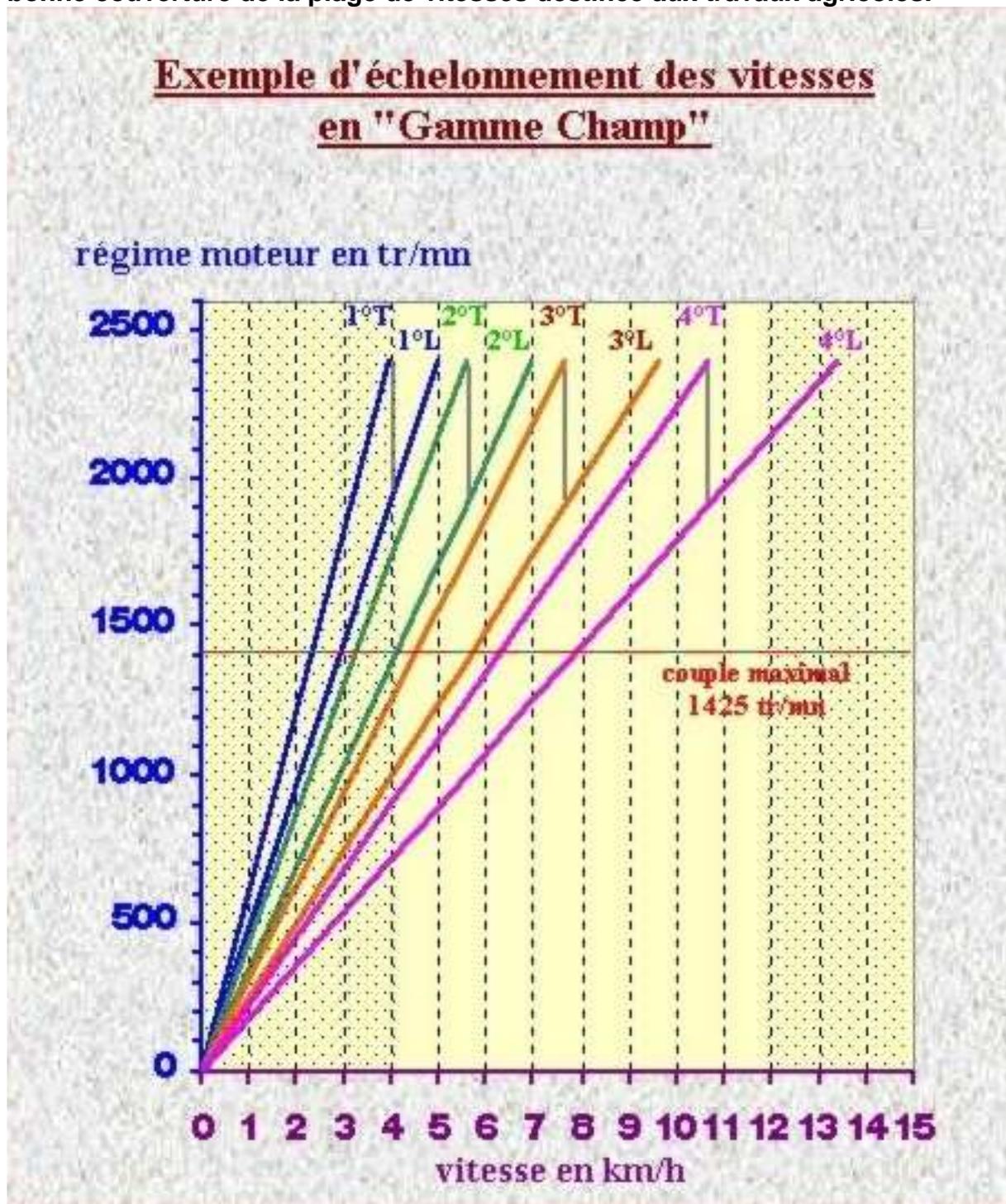


FIG 26 a

Le rapport de progression est dans ce cas pratiquement géométrique.

	"Tortue":	"Lièvre":
1°:	3.97 km/h	4.98 km/h
2°:	5.57 km/h	6.99 km/h
3°:	7.68 km/h	9.63 km/h
4°:	10.69 km/h	13.42 km/h

FIG 26 b

Lorsque l'on engage un rapport supérieur, il est souhaitable que l'étagement soit tel que le régime du moteur reste bien supérieur au régime de couple maximal, de manière à garantir une bonne réserve de couple.

### EXEMPLES D'ECHELONNEMENT DES VITESSES

Lorsque le recouvrement des rapports est insuffisant il se caractérise, notamment pour les vitesses de déplacement sur route, par le "trou" caractéristique qui rend laborieuse la reprise du régime moteur.

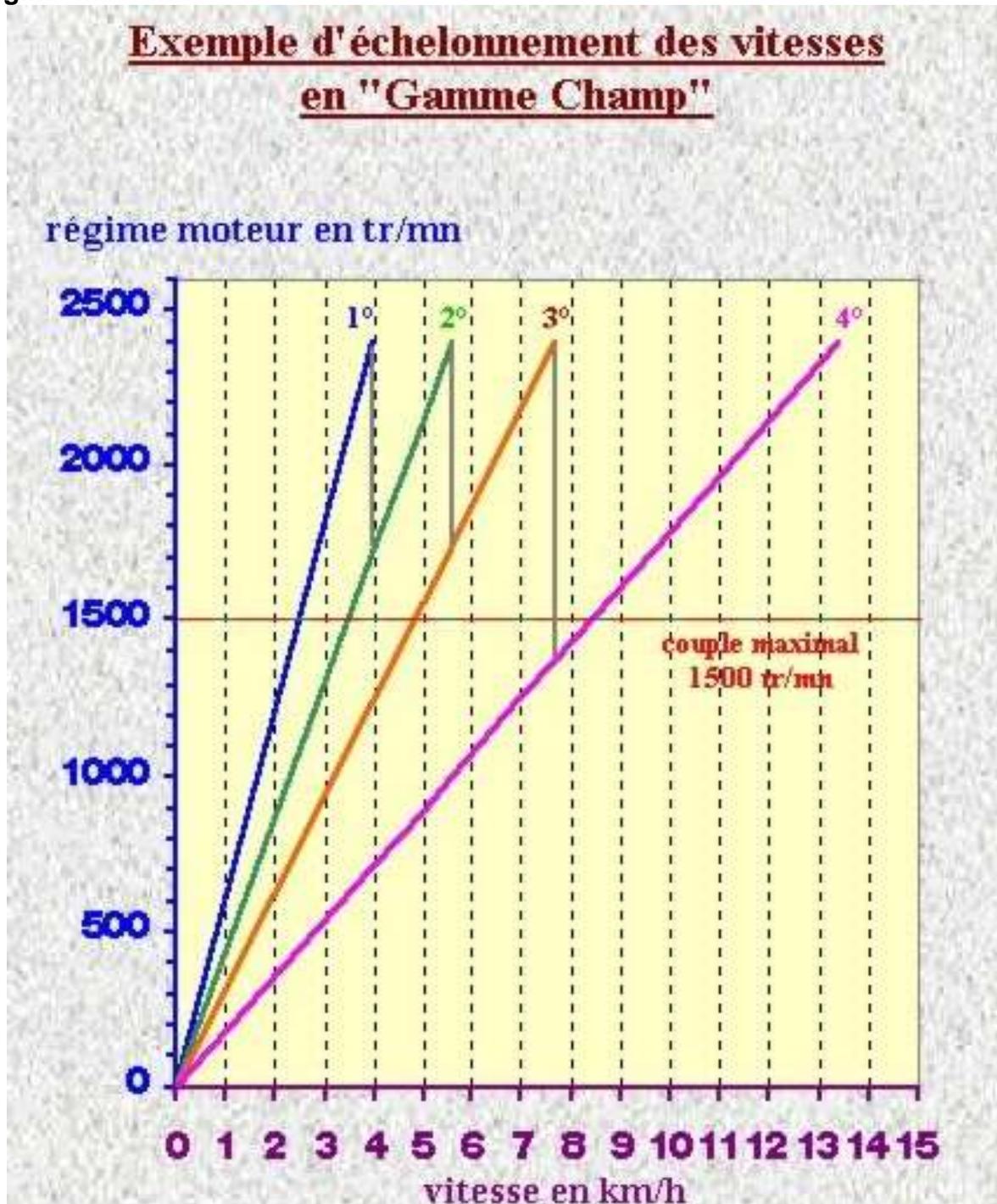


FIG 27

Un rapport de progression doit être assez faible pour que lors du passage à un rapport supérieur, on ne fasse pas chuter le régime du moteur en dessous du régime de couple maximal ce qui risquerait de faire caler le moteur si le tracteur est en charge.

Un rapport de progression élevé ne pourra être accepté que lorsqu'il y a abondance de couple moteur compte tenu de la capacité de traction de l'engin.

## LA PUISSANCE DISPONIBLE A LA JANTE

La courbe de puissance à la jante est, pour chaque rapport, l'image de la puissance du moteur compte tenu de l'augmentation du couple dû à la réduction du régime de rotation.



FIG 30

Pour chaque rapport on détermine une surface correspondant à la puissance exploitable.

On constate qu'entre deux rapports consécutifs il apparaît une zone inexploitable dont la surface est d'autant plus importante que le rapport de progression est élevé.

Seule la multiplication du nombre de rapports permet de réduire cet espace.

**La courbe qui enveloppe les quatre rapports, exploite la totalité des possibilités du moteur: c'est la courbe qui serait obtenue grâce à une transmission à variation continue du rapport de transmission.**

**La courbe caractéristique de puissance d'un moteur est acheminée vers les demi arbres de roues, le régime de rotation ayant considérablement diminué le couple disponible est très élevé.**

**Chaque rapport de vitesse permet de tracer une courbe de puissance équivalente à celle du moteur (au rendement de la transmission près) qui met en évidence la discontinuité plus ou moins importante des rapports de la transmission.**

## LA COURBE D'ISOPUISSANCE

On peut également étudier l'étagement des rapports à partir du couple disponible à la jante qui est l'image du couple moteur en fonction du rapport engagé.

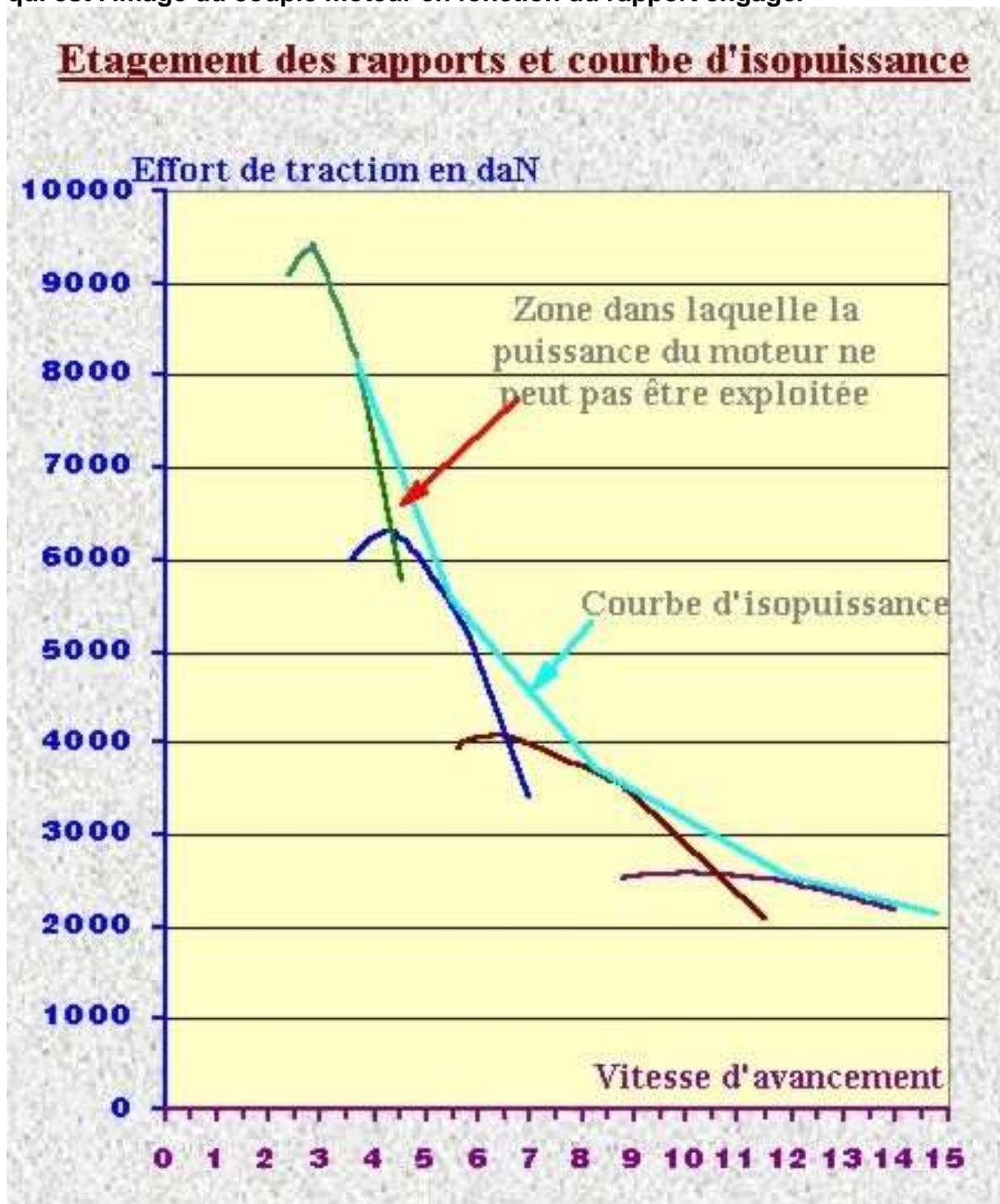


FIG 28

Sur cette courbe on porte, en ordonnées, l'effort de traction théorique et en abscisses la vitesse d'avancement théorique (qui ne tient pas compte du glissement).

Le produit de la vitesse d'avancement par la force de traction correspondante donne la puissance théorique à la barre, c'est à dire la puissance du moteur moins le rendement mécanique.

Chacune de ces courbes venant tangenter la courbe d'isopuissance en un point précis, on voit apparaître des zones de puissance inexploitable dont la surface dépend de l'étagement des rapports.

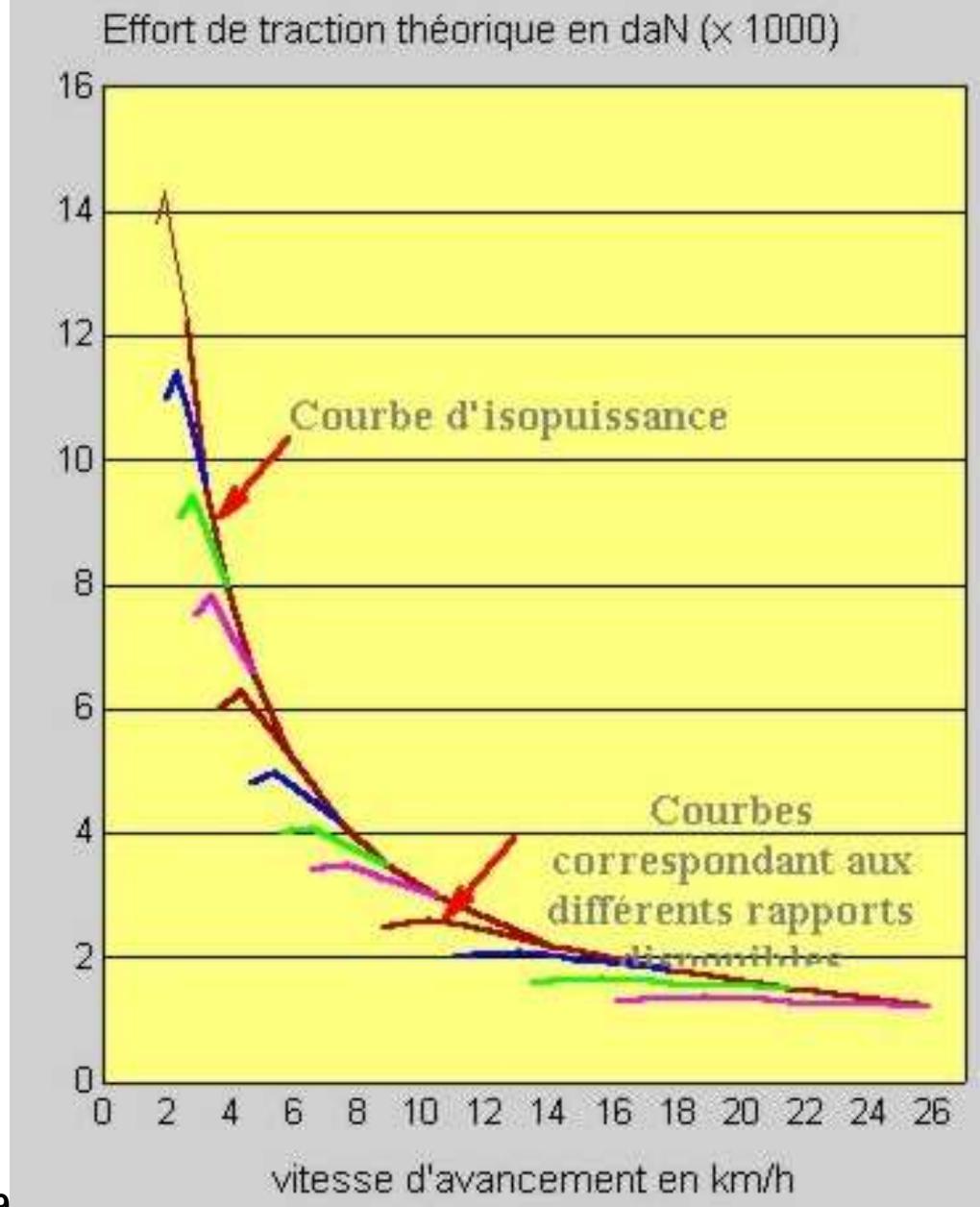
Dans le cas d'un engin de traction comme le tracteur agricole, l'effort de traction théorique ne représente pas l'effort mesuré du fait que la liaison particulière du pneumatique avec le sol est fonction du coefficient d'adhérence:

L'effort de traction réellement engendré résulte en fait de ce coefficient d'adhérence multiplié par le poids s'exerçant effectivement sur les roues motrices.

#### LA COURBE D'ISOPUISSANCE

La courbe d'isopuissance délimite une frontière au delà de laquelle on dépasse la puissance installée. L'exploitation optimale du moteur consiste à disposer d'une transmission qui permette d'accéder en conditions limites à chaque point de la courbe d'isopuissance.

## COURBE d'ISOPUISSANCE ETAGEMENT des RAPPORTS



**FIG 29**

Seules les transmissions à variation continue du rapport de transmission (le variateur mécanique à courroie, les transmissions hydrostatiques, ainsi que les transmissions hydrocinétiques) permettent de suivre fidèlement la courbe d'isopuissance mais elles le font au détriment du rendement global.

Si l'on considère ces courbes, on constate que la multiplication des rapports diminue l'étendue des surfaces dans lesquelles la puissance du moteur ne peut pas être exploitée.

Les valeurs théoriques portées en effort de traction sont à minorer en fonction du coefficient d'adhérence de même que la vitesse réelle d'avancement est à minorer en fonction du glissement.

**Le résultat final fait apparaître un rendement d'environ 40% pour les tracteurs à deux roues motrices et 60% pour les tracteurs à quatre roues motrices.**

**La courbe d'isopuissance traduit la puissance du moteur (  $C \omega$  ) en puissance théorique à la barre (  $F \cdot v$  ), elle permet de mettre en évidence les zones de la puissance du moteur qui ne peuvent pas être exploitées à cause de l'étagement des rapports.**

**On ne pourrait suivre fidèlement la courbe d'isopuissance (qui est une hyperbole) que grâce à une infinité de rapports de démultiplication: ce résultat est obtenu grâce à une transmission à variation continue du rapport de transmission.**