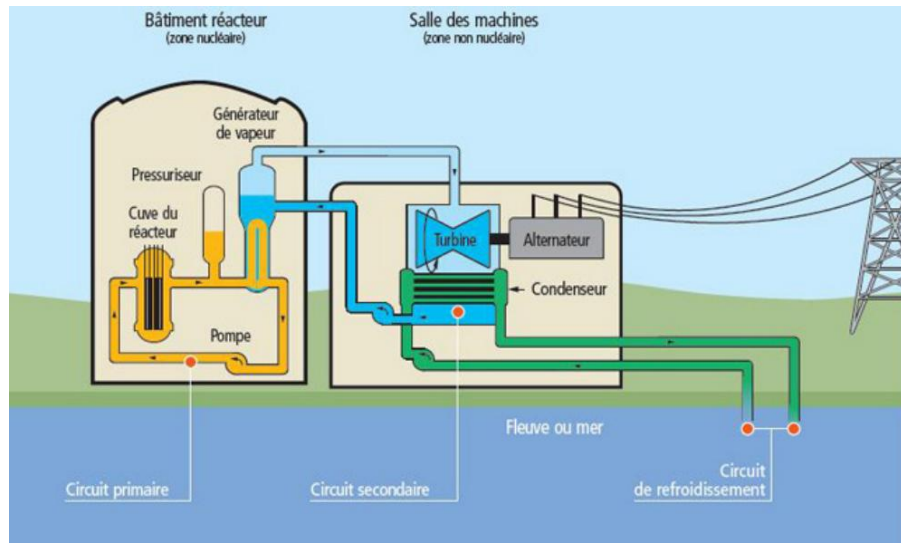


La durée est de 4 heures.  
Les calculatrices sont autorisées.

## Problème 1 Etude d'une installation nucléaire

La France compte 19 centrales nucléaires en exploitation, dans lesquelles tous les réacteurs (58 au total) sont des réacteurs à eau pressurisée. Actuellement, ces installations produisent près de 80% de l'électricité produite en France. Chaque centrale est soumise à un référentiel de normes de sûreté et de sécurité évoluant en fonction des enseignements des incidents passés nationaux ou internationaux.

Le but de ce problème est d'étudier quelques aspects liés au fonctionnement d'une centrale nucléaire REP (réacteur à eau pressurisée).



Une centrale nucléaire est un site industriel destiné à la production d'électricité, qui utilise comme chaudière un réacteur nucléaire pour produire de la chaleur. Une centrale nucléaire REP est constituée de deux grandes zones :

- une zone non nucléaire (salle des machines). Dans cette partie, semblable à celle utilisée dans les centrales thermiques classiques, s'écoule de l'eau dans un circuit secondaire. Cette eau est évaporée dans le Générateur de Vapeur (GV) par absorption de la chaleur produite dans la zone nucléaire, puis elle entraîne une turbine (T) couplée à un alternateur produisant de l'électricité, ensuite elle est condensée au contact d'un refroidisseur (rivière ou mer ou atmosphère via une tour aéroréfrigérante) et enfin, elle est comprimée avant d'être renvoyée vers le générateur de vapeur

- une zone nucléaire (dans le bâtiment réacteur), où ont lieu les réactions nucléaires de fission, qui produisent de l'énergie thermique et chauffent ainsi l'eau sous pression circulant dans le circuit primaire. Le transfert d'énergie thermique entre le circuit primaire et le circuit secondaire se fait dans le générateur de vapeur, où la surface d'échange entre les deux fluides peut atteindre près de  $5000 \text{ m}^2$  (réseau de tubulures).

### Description du circuit secondaire de la centrale

Considérons une centrale nucléaire REP produisant une puissance électrique  $P_e = 900 \text{ MW}$ . Le fluide circulant dans le circuit secondaire est de l'eau, dont l'écoulement est supposé stationnaire. Le cycle thermodynamique décrit

par l'eau est un cycle ditherme moteur. L'eau liquide sera supposée incompressible et de capacité thermique massique isobare supposée constante. Le tableau en bas de la page 3 donne diverses données thermodynamiques relatives à l'équilibre liquide-vapeur de l'eau.

## Cycle de Carnot

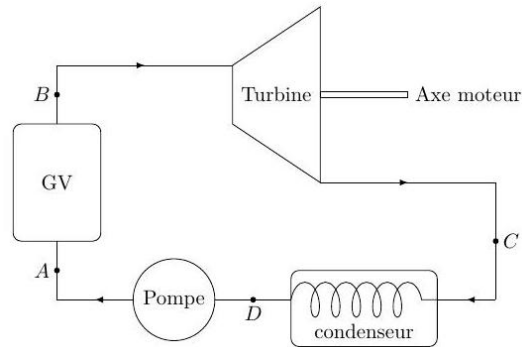
Dans une première approche simplifiée, on considère le moteur ditherme de Carnot fonctionnant de manière réversible entre deux sources de température  $T_{\text{ch}}$  et  $T_{\text{fr}}$  ( $T_{\text{fr}} < T_{\text{ch}}$ ).

1. Donner, en la redémontrant, l'expression du rendement de Carnot associé à ce cycle.
2. Donner la valeur numérique de ce rendement en prenant  $T_{\text{ch}} = 543 \text{ K}$  et  $T_{\text{fr}} = 303 \text{ K}$ , les deux températures extrêmes de l'eau dans le circuit secondaire.
3. Sachant qu'un réacteur REP fournit à l'eau du circuit secondaire, via le générateur de vapeur, une puissance thermique  $P_t = 2785 \text{ MW}$ , que vaut le rendement thermodynamique réel de l'installation ? On supposera que la puissance mécanique transmise à la turbine est intégralement convertie en puissance électrique. Commenter.

## Cycle de Rankine

L'eau du circuit secondaire subit les transformations suivantes :

- de  $A$  à  $B$  : dans le générateur de vapeur, échauffement isobare du liquide à la pression  $P_2 = 55 \text{ bar}$  jusqu'à un état de liquide saturant (état noté  $A'$ ), puis vaporisation totale isobare jusqu'à un état de vapeur saturante sèche (état  $B$ ) ;
- de  $B$  à  $C$  : détente adiabatique réversible dans la turbine, de la pression  $P_2$  à la pression  $P_1 = 43 \text{ mbar}$  ;
- en  $C$ , le fluide est diphasé ;
- de  $C$  à  $D$  : liquéfaction totale isobare dans le condenseur, jusqu'à un état de liquide saturant ;
- de  $D$  à  $A$  : compression adiabatique réversible, dans la pompe d'alimentation, de la pression  $P_1$  à la pression  $P_2$ , du liquide saturant sortant du condenseur. On négligera le travail consommé par cette pompe devant les autres énergies mises en jeu.



4. Représenter dans le diagramme de Clapeyron ( $P, v$ ) l'allure de la courbe de saturation de l'eau, ainsi que les isothermes  $T_B, T_D$  et  $T_{\text{critique}}$ , cette dernière température étant celle du point critique de l'eau. Préciser les domaines du liquide, de la vapeur, de la vapeur saturante. Représenter sur ce même diagramme l'allure du cycle décrit par l'eau du circuit secondaire. Indiquer le sens de parcours du cycle et placer les points  $A, A', B, C$  et  $D$ .

5. D'après l'extrait de table thermodynamique donné page 3, quelles sont les valeurs des températures, des enthalpies massiques et des entropies massiques aux points  $A', B$  et  $D$  ? On pourra donner les valeurs sous forme de tableau.

6. Dans le document réponse de la page 4 (à rendre avec la copie), figure le diagramme enthalpique ( $P, h$ ) de l'eau. Placer, avec soin et à l'échelle, les points  $A', B, C, D$  du cycle.

7. Dans toute la suite, on négligera les variations d'énergie cinétique et potentielle dans les bilans énergétiques. Exprimer alors, sans démonstration, le premier principe de la thermodynamique pour un fluide en écoulement stationnaire recevant de manière algébrique le travail massique utile  $w_u$  et le transfert thermique massique  $q$ .

8. Exprimer le travail massique  $w_{BC}$  reçu par l'eau dans la turbine. Donner sa valeur numérique, en s'aidant du diagramme enthalpique.

9. Exprimer le transfert thermique massique  $q_{AA'}$  reçu par l'eau liquide quand elle passe de manière isobare de la température  $T_A$  à la température  $T_{A'}$  dans le générateur de vapeur. Donner sa valeur numérique : on considérera  $T_A \approx T_D$ .

10. Exprimer le transfert thermique massique  $q_{A'B}$  reçu par l'eau quand elle se vaporise complètement dans le générateur de vapeur. Donner sa valeur numérique.

11. Calculer alors le rendement de Rankine de l'installation. Comparer au rendement de Carnot et commenter. Comparer au rendement réel et commenter.

12. Dans quel état se trouve l'eau à la fin de la détente de la turbine? Donner le titre massique en vapeur à l'aide du diagramme enthalpique. En quoi est-ce un inconvénient pour les parties mobiles de la turbine?

## Cycle de Rankine avec détente étagée

Le cycle réel est plus compliqué que celui étudié précédemment. En effet, d'une part, la détente est étagée : elle se fait d'abord dans une turbine « haute pression » puis dans une turbine « basse pression ». D'autre part, entre les deux turbines, l'eau passe dans un « surchauffeur ». Les transformations sont maintenant modélisées par :

- de  $A$  à  $B$  : dans le générateur de vapeur, échauffement isobare du liquide à la pression  $P_2 = 55$  bar, jusqu'à un état de liquide saturant (état noté  $A'$ ), puis vaporisation totale isobare jusqu'à un état de vapeur saturante sèche (point  $B$ ) ;

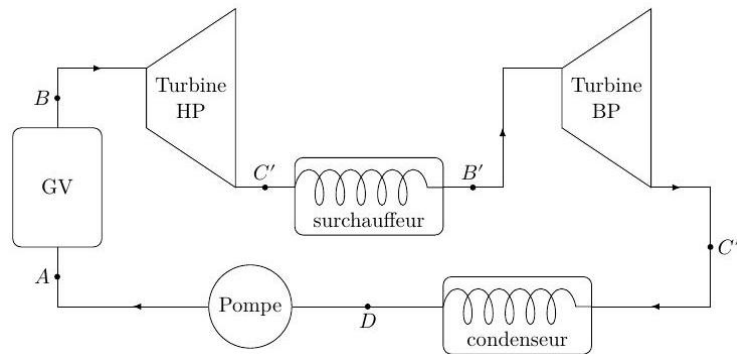
- de  $B$  à  $C'$  : détente adiabatique réversible dans la turbine HP, de la pression  $P_2$  à la pression  $P_3 = 10$  bar ;

- de  $C'$  à  $B'$  : échauffement isobare à la pression  $P_3$ , dans le surchauffeur, jusqu'à un état de vapeur saturante sèche (point  $B'$ ) ;

- de  $B'$  à  $C''$  : détente adiabatique réversible dans la turbine BP, de la pression  $P_3$  à la pression  $P_1 = 43$  mbar

- de  $C''$  à  $D$  : liquéfaction totale isobare dans le condenseur, jusqu'à un état de liquide saturant ;

- de  $D$  à  $A$  : compression adiabatique réversible, dans la pompe d'alimentation, de la pression  $P_1$  à la pression  $P_2$ , du liquide saturant sortant du condenseur. On négligera le travail consommé par cette pompe devant les autres énergies mises en jeu.



13. Placer les nouveaux points  $C'$ ,  $B'$ ,  $C''$  sur le diagramme enthalpique du document réponse.

14. Comparer les titres massiques en vapeur des points  $C'$  et  $C''$  au titre massique en vapeur du point  $C$ . Quel est l'intérêt de la surchauffe ?

15. À l'aide du diagramme enthalpique, déterminer le nouveau rendement du cycle. Commenter.

## Données :

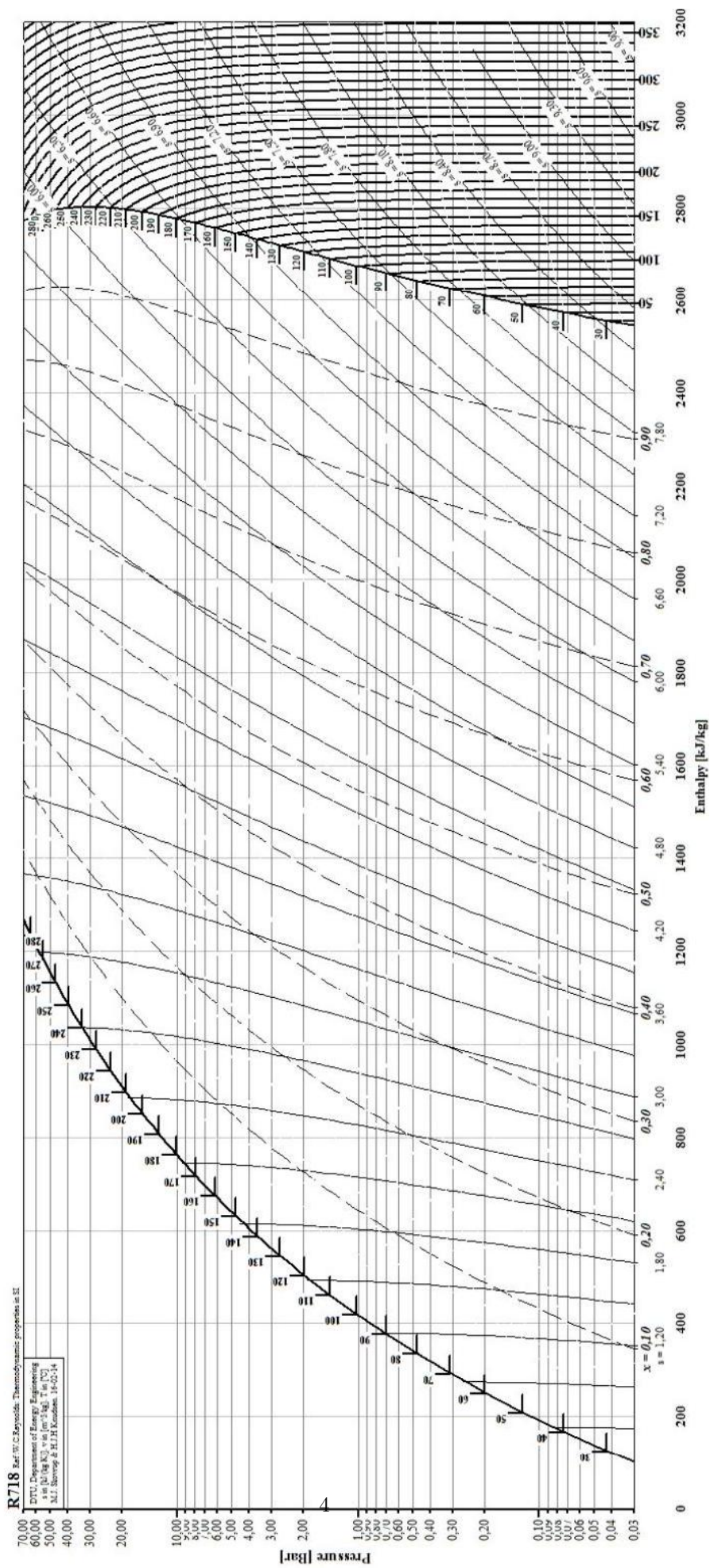
Extrait de table thermodynamique relatif à l'équilibre liquide-vapeur de l'eau :

$\theta$ (°C)	$P_{\text{sat}}$ (bar)	Liquide saturant			Vapeur saturante sèche		
		$v_l$ (m <sup>3</sup> .kg <sup>-1</sup> )	$h_l$ (kJ.kg <sup>-1</sup> )	$s_l$ (J.K <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup> )	$v_v$ (m <sup>3</sup> .kg <sup>-1</sup> )	$h_v$ (kJ.kg <sup>-1</sup> )	$s_v$ (J.K <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup> )
30	0,043	1,0047	125,22	0,4348	32,892	2555,92	8,4530
180	10	1,1276	763,18	2,1395	0,119404	2777,84	6,5854
270	55	1,3053	1190,10	2,9853	0,03505	2788,46	5,9226

$\theta$  : température ;  $P_{\text{sat}}$  : pression de vapeur saturante ;  $v_l$  : volume massique du liquide saturant ;  $h_l$  : enthalpie massique du liquide saturant ;  $s_l$  : entropie massique du liquide saturant ;  $v_v$  : volume massique de la vapeur saturante sèche ;  $h_v$  : enthalpie massique de la vapeur saturante sèche ;  $s_v$  : entropie massique de la vapeur saturante sèche

Capacité thermique massique isobare de l'eau :  $c = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

Les températures sont exprimées en °C



## Problème 2 Moteur thermique

### Étude comparative des différents carburants

Les principaux combustibles automobiles sont :

- l'essence SP98 dont l'octane  $C_8H_{18}$  est le principal constituant ;
- le GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié) constitué en proportion molaire d'environ 50% de propane  $C_3H_8$  et 50% de butane  $C_4H_{10}$ . Une mole de GPL se compose ainsi de 0,5 mole de propane et de 0,5 mole de butane ;
- le GNV (Gaz Naturel pour Véhicules) essentiellement constitué de méthane  $CH_4$ .

1. Écrire les réactions de combustion d'une mole de ces hydrocarbures par le dioxygène de l'air qui aboutit à la formation de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone.
2. Évaluer pour la combustion du méthane l'enthalpie de réaction  $\Delta_r H_1^\circ$  à 298 K. Commenter son signe.
3. Pour les combustions respectives d'une mole de GPL et d'une mole d'essence SP98, on a  $\Delta_r H_2^\circ = -2351 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$  et  $\Delta_r H_3^\circ = -5068 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ . En déduire pour chacun de ces trois combustibles, l'énergie libérée par mole de  $CO_2$  formée.
4. Le «bonus écologique», allègement de taxe accordé pour le GPL, est-il de nature à contribuer à limiter les émissions de  $CO_2$  (par rapport à l'utilisation d'essence SP98) ?

### Étude thermodynamique du moteur PSA EB2

Ce moteur, connu sous sa dénomination commerciale 1,2 Puretech, équipe en particulier les Peugeot 108, 208 et 2008, les Citroën C1, C3, C4 Cactus ainsi que la DS3.

Architecture : 3 cylindres en ligne.

Puissance maximale : 82 ch à 5750tr/min.

Rapport volumétrique de compression :  $\delta = \frac{V_{PMB}}{V_{PMH}} = \frac{V_1}{V_2} = 11$ .

Cylindrée :  $1199 \text{ cm}^3$ .

On rappelle que la cylindrée d'un moteur à combustion interne correspond au volume d'air aspiré par l'ensemble des cylindres du moteur lors un cycle.

Compte tenu de la faible proportion d'essence dans le mélange air-essence, celui-ci sera assimilé uniquement à l'air qu'il contient, lui-même considéré comme un gaz parfait diatomique.

**Le fonctionnement du moteur est décrit dans le document page 7.**

5. Déterminer, à l'aide de la cylindrée et du rapport volumétrique de compression, les valeurs numériques exprimées en  $\text{cm}^3$  des volumes  $V_1$  et  $V_2$  correspondant respectivement au point mort bas et au point mort haut.

6. Tracer dans un diagramme de Watt (pression en ordonnées, volume d'un des trois cylindres en abscisses) l'allure du cycle idéalisé, appelé cycle de Beau de Rochas et décrit dans le document. On veillera à faire figurer les points A, B, C, D et E.

Dans la suite du problème, le modèle adopté est celui du cycle idéal décrit à pleine puissance par le moteur EB2 et synthétisé dans le tableau 1.

Point	A	B	C	D	E
P ( bar )	1	1	$P_C$	$P_D$	4
V ( $\text{cm}^3$ )	40	440	40	40	440
T(K)	300	300	$T_C$	2820	1193

Tableau 1 - Cycle thermique du moteur EB2

On rappelle la valeur de la constante des gaz parfait :  $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

On rappelle également la relation de Mayer :  $C_{pm} - C_{vm} = R$ , où  $C_{pm}$  et  $C_{vm}$  désignent respectivement les capacités thermiques molaires à pression et à volume constant pour un gaz parfait ; ainsi que le rapport des capacités thermiques pour un mélange air-essence :  $\gamma = \frac{C_{pm}}{C_{vm}} = 1,4$ .

7. Déterminer les valeurs manquantes :  $P_C, P_D, T_C$ .
  8. Déterminer la valeur numérique du travail  $W_{BC}$  reçu par le gaz au cours de la compression BC.
  9. Déterminer le transfert thermique  $Q_{CD}$  reçu par le gaz au cours de l'explosion CD.
  10. On donne  $|W_{DE}| = 596 \text{ J}$  et  $|Q_{EB}| = 328 \text{ J}$ . Déterminer la valeur numérique du rendement  $R_{dt}$  du cycle.
  11. Comparer le rendement  $R_{dt}$  trouvé précédemment avec celui d'un cycle de Carnot pour lequel  $T_{fr} = 300 \text{ K}$  et  $T_{ch} = 2820 \text{ K}$ .
  12. Ce cycle est-il compatible avec la puissance maximale de 82 ch à 5750tr/min annoncée par le constructeur ? On remarquera qu'il faut deux tours de vilebrequin pour effectuer un cycle thermodynamique. 1cheval vaut 736 W et la masse volumique de l'essence SP98 est de  $\rho = 720 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .
  13. On supposera que ce cycle correspond aussi à celui décrit par une Peugeot 108 lors d'une utilisation autoroutière effectuée à la vitesse stabilisée de 130 km/h, le moteur tournant alors au régime de 3600tr/min.
- Évaluer dans ces conditions d'utilisation la consommation d'essence exprimée en L/100 km, ainsi que le rejet de  $\text{CO}_2$  exprimé en g/km.

## Caractéristiques d'une Peugeot 108 équipée du moteur EB2

Consommation mixte :

- Donnée constructeur : 4,3 l/100 km.
- Essai Autoplus n°1450 : 5,7 l/100 km.

Rejet moyen de  $\text{CO}_2$  donné par le constructeur : 99 g/km.

## Données :

### Grandeurs chimiques

Enthalpies standards de formation à 298 K :

Corps	$\text{CH}_4$	$\text{H}_2\text{O(g)}$	$\text{CO}_2$
$\Delta_f H^\circ$ (kJ.mol <sup>-1</sup> )	-74,8	-241,8	-393,5

Masses molaires :

Atomes	H	C	O
M (g.mol <sup>-1</sup> )	1	12	16