

76

numéro spécial
septembre - octobre

L'ATMOSPHÈRE DU MÉTRO



RATP

REGIE
AUTONOME
DES
TRANSPORTS
PARISIENS

53 ter, quai des Grands-Augustins
75271 PARIS CEDEX 06

L'ATMOSPHERE DU METRO

D. SUTTON . Ingénieur Général

J. FLAHAUT . Inspecteur Principal

**Bulletin de documentation et d'information
édité par la Direction des Etudes Générales**

Numéro spécial
réalisé par la Direction des Services Techniques

SOMMAIRE

INTRODUCTION	5
CHAPITRE 1 : Caractères spécifiques de l'atmosphère du métro	6
1-1 – La composition de l'air	6
1-2 – Les paramètres physiques d'état de l'air	7
1-3 – La notion de confort thermique	10
1-4 – Les objectifs de la Régie	11
CHAPITRE 2 : Situation actuelle des équipements de traitement d'air	12
2-1 – Le métro urbain	12
2-2 – Le métro régional	15
CHAPITRE 3 : Les moyens mis en œuvre pour améliorer l'atmosphère du métro	18
3-1 – Amélioration de la ventilation	18
3-2 – Diminution de la chaleur dissipée en tunnel	19
3-3 – Climatisation des stations	19
3-4 – Climatisation des rames de métro	19
3-5 – Cheminées d'équilibre	20
3-6 – Nettoyage	20
3-7 – Actions prospectives	21
CONCLUSION	21
ANNEXE 1 : Contrôle des températures du réseau urbain. Résultats de l'année 1975	23
ANNEXE 2 : Réalisation technique d'un poste de ventilation	29
ANNEXE 3 : Courbes de température des lignes	33
ANNEXE 4 : Plan d'implantation des ventilateurs et baies d'aération	57

Salle des échanges d'Auber



Rapport sur les conditions ambiantes de l'atmosphère du métro

état au 1.7.76

INTRODUCTION

Jusqu'aux environs des années 60, l'atmosphère du métro était relativement fraîche et salubre bien qu'on y remarquât fréquemment une odeur d'ozone et en quelques endroits un certain manque d'aération.

Cette situation acceptable s'est rapidement dégradée au point de vue de la température, avec l'introduction et la généralisation de trains modernes dont les performances sont notablement supérieures à celles de l'ancien matériel roulant du type « SPRAGUE ». La Régie, en effet, a pu accroître son service auprès des voyageurs en renforçant le trafic par la réduction de l'intervalle entre les trains et l'introduction de trains plus puissants et plus rapides.

La transformation en chaleur de l'énergie cinétique des trains, au moment du freinage, a entraîné des apports caloriques beaucoup plus élevés, qui ont provoqué la hausse significative de la température constatée dans les souterrains.

Les premières lignes du métro comportaient à l'origine quelques baies d'aération qui permettaient un léger renouvellement de l'air du tunnel. Vers 1900, au début de l'exploitation du métro, les Parisiens s'en trouvaient très satisfaits. Plus tard, les nouvelles lignes ont été partiellement équipées de ventilateurs centrifuges de faible débit. Mais ces dispositions se sont révélées insuffisantes pour absorber toutes les calories supplémentaires dues à l'accroissement du trafic.

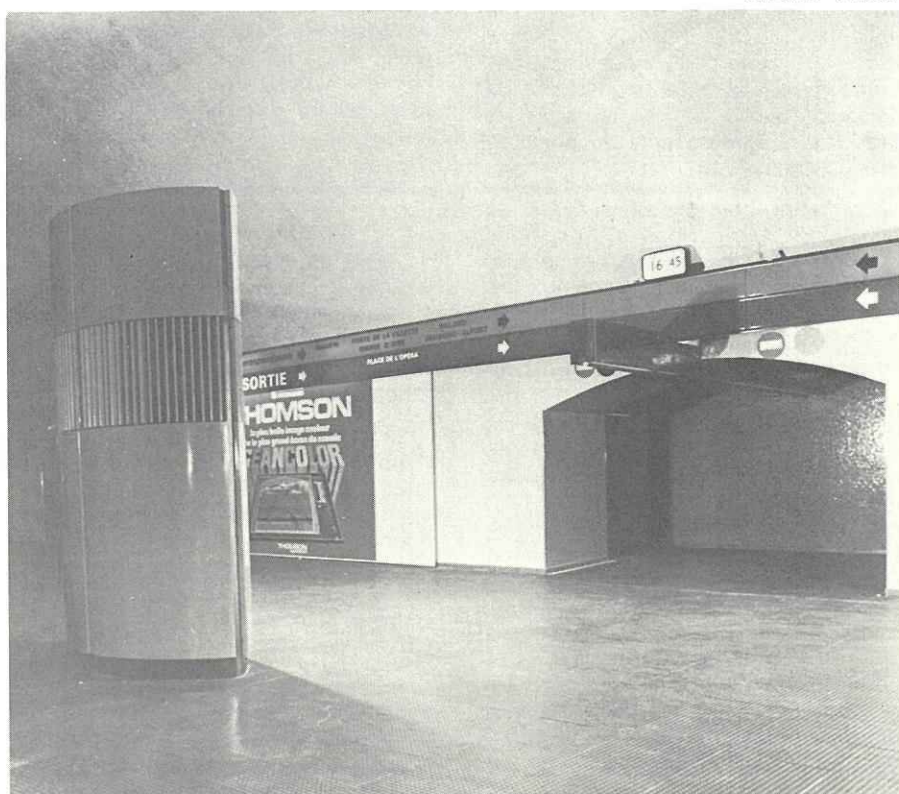
Aussi, depuis 1967, la Régie a-t-elle cherché à remédier à cette dégradation de la qualité de l'atmosphère du métro en renforçant de façon importante la ventilation des lignes.

Cette action est bénéfique à plusieurs titres : elle évite une élévation trop importante de la température et grâce au renouvellement fréquent de l'air, elle permet de diminuer le confinement et de mieux évacuer les mauvaises odeurs.

Bien que déjà largement entamée, cette opération est loin d'être terminée car elle doit accompagner, sur toutes les lignes, le renforcement du trafic et l'introduction des trains modernes, prévus au plan d'entreprise. Cette ventilation doit être complétée par des moyens propres à réduire les courants d'air provoqués par l'effet de piston des trains et à améliorer la circulation de l'air dans le souterrain.

Le présent document, après un rappel des caractéristiques de l'air du métro, présente les objectifs de la RATP en matière de confort thermique et de salubrité de l'air ; il fait le point de la situation actuelle ; il précise les prévisions du plan d'entreprise en la matière, établies de façon à rattraper le retard accumulé et à faire face au renforcement envisagé de l'exploitation ; enfin, il mentionne les études fondamentales poursuivies avec l'aide de l'Université ou d'organismes extérieurs, afin de mieux comprendre et de mieux maîtriser les phénomènes physiques qui donnent au voyageur une impression de confort ou de bien-être.

Station Auber



Chapitre I

Caractères spécifiques de l'atmosphère du métro et objectifs de la Régie

La définition la plus simple que l'on pourrait donner de l'atmosphère du métro est la suivante : milieu dans lequel vit l'usager. Deux aspects peuvent en être examinés alors, le premier purement physique concerne la qualité de l'air et de tout ce qui le compose, le second, où la psychologie commence à intervenir de façon plus appréciable, consiste en l'ensemble des facteurs pouvant intervenir sur les sensations du voyageur, qu'il s'agisse du bruit, de la couleur, de la promiscuité, etc. Dans le présent rapport nous nous limiterons uniquement aux facteurs physiques de l'air sans perdre de vue toutefois les faits les plus marquants du point de vue psychologique.

Comment peut-on alors définir la qualité de l'air ? Nous distinguerons deux parties : celle relative à sa composition et celle relative aux conditions physiques dans lesquelles il se trouve.

1.1. La composition de l'air

La composition de l'air du métro est très proche de celle de l'atmosphère de la Région parisienne – c'est-à-dire 78 % d'azote, 21 % d'oxygène et 1 % de gaz divers : gaz composés du carbone, gaz rares (argon 0,9 %, néon 0,02 %, hélium 0,0005 %, infimes parties de xénon et de krypton), hydrocarbures, hydrogène, composés soufrés, composés nitreux, etc. – et comme cette dernière elle est porteuse de poussières, fines particules solides dont la production par des sources industrielles ou ménagères est très variée.

Nous examinerons dans ce paragraphe les différents composants dont la présence ou l'absence peut avoir une influence sur le comportement des voyageurs. Par contre, nous n'aborderons pas l'étude de l'azote et de l'oxygène qui, bien qu'éléments fondamentaux dans la vie des animaux et des plantes, n'ont pas de spécificité en ce qui nous concerne. En effet, les faibles variations de teneur que l'on peut rencontrer ne conduisent jamais à des phénomènes décelables.

1.1.1. Le gaz carbonique (dioxyde de carbone CO_2)

Le gaz carbonique présent dans l'air extérieur devient d'une teneur plus importante dans tout local où séjournent des personnes et pour cette raison, on rencontre d'assez fortes concentrations en gaz carbonique dans les voitures de la RATP. Pour définir ces concentrations on utilise un indicateur appelé taux de confinement : c'est le rapport de la teneur en CO_2 dans l'air du local étudié par rapport à la teneur en CO_2 dans l'air extérieur. Des relevés systématiques sont depuis plusieurs années effectués par le laboratoire d'hygiène de la ville de Paris. Des analyses d'atmosphère sont également effectuées par le laboratoire de la RATP, en certains points particuliers et à la demande du service de l'exploitation ou des services d'entretien.

Actuellement le confinement s'évalue en fonction de l'échelle suivante :

- début de confinement : $C > 3$;
- confinement notable : $C > 5$;
- confinement important : $C > 7$;
- confinement très important : $C > 9$;
- confinement limite pour un séjour de 8 heures : $C = 10$.

Le laboratoire d'hygiène de la ville de Paris qui nous communique les résultats des relevés qu'il effectue nous signale assez souvent des taux de confinement compris entre 3 et 5 pendant les heures de forte affluence. Parfois, en de très rares occasions, à bord des trains le taux de confinement peut atteindre des valeurs supérieures à 7.

Les valeurs relevées sur les lignes ventilées montrent bien que le taux de confinement diminue en fonction de l'aération et des taux critiques ne seront plus à craindre quand le renouvel-

lement de l'air du tunnel sera suffisant sauf peut-être dans les voitures lors des périodes de très forte affluence.

1.1.2. Le monoxyde de carbone (CO)

Ce gaz très dangereux, incolore et inodore provoque des maux de tête pour des concentrations de l'ordre de 50 p.p.m. et devient mortel pour des concentrations dix fois plus fortes. Il est produit essentiellement par la circulation des automobiles (car il provient surtout des gaz d'échappement des moteurs à combustion) et de façon bien moindre par le chauffage domestique en hiver.

Le métro n'est pas producteur de CO. Pourtant, en certains points, on peut déceler la présence de monoxyde de carbone apporté de l'extérieur par la ventilation. Mais les teneurs ne sont jamais inquiétantes. La concentration en CO de l'air du tunnel est d'ailleurs toujours inférieure à celle rencontrée au niveau de la rue, car ce gaz est plus léger et généralement plus chaud que l'air ambiant et il a tendance, du fait de son instabilité, à se combiner avec l'oxygène de l'air sous forme de gaz carbonique.

1.1.3. Les autres gaz toxiques

L'ozone, dont les pouvoirs thérapeutiques sont bien connus, peut devenir pour des teneurs trop fortes, générateur de malaises. La traction électrique du métro provoque, par suite de formation d'arcs électriques, de très faibles quantités d'ozone très instable qui se retransforme très rapidement en oxygène. La teneur en ozone dans l'air du métro est très faible et les effets de ce gaz peuvent être considérés comme négligeables. L'adoption de nouvelles techniques pour les matériels électriques fera encore baisser cette teneur en réduisant la formation des arcs.

Les oxydes d'azote ou de soufre sont rares. On peut les rencontrer parfois accidentellement dans le métro par apport d'air extérieur. D'autres gaz peuvent aussi pénétrer dans le tunnel par suite d'une fuite dans une canalisation voisine, mais ce fait est très peu probable et l'on peut noter qu'il n'y a jamais eu de seuils inquiétants dépassés depuis près de 75 ans.

1.1.4. Les poussières

Ce sont de fines particules solides qui sont entraînées par l'air du métro. Elles peuvent se déposer sur les parois et y former une couche assez importante. Les câbles qui parcourent le tunnel attirent préférentiellement la poussière du fait des phénomènes électrostatiques qu'ils provoquent. De même, les zones où il y a d'importants mouvements d'air sont très touchées; par exemple les lanterneaux des voitures, les locaux des ventilateurs où les installations doivent être nettoyées périodiquement.

Les poussières proviennent des usures répétées (semelles des voyageurs, patins de frein), de l'apport extérieur (ventilation, aération, vêtements des voyageurs) ou des travaux de génie civil (creusement de nouvelles galeries, remise à neuf, etc.).

1.1.5. Les microbes

Comme tout endroit très fréquenté, le métro est un lieu où les concentrations microbiennes sont assez élevées, mais il n'y a rien d'alarmant. Pour lutter contre cette pollution il y a encore quelques années, le tunnel était régulièrement chaulé, mais cette méthode a été abandonnée en raison des risques d'amorçage électrique. Dans le tunnel, les installations d'épuisement et les nettoyages périodiques évitent que les eaux qui proviennent du ruissellement par les parois puissent croupir et entraîner la multiplication des gènes.

Dans les stations, le nettoyage journalier est un des meilleurs atouts de la lutte contre les microbes. Régulièrement des produits bactéricides sont ajoutés aux eaux de lavage des sols. Mais c'est surtout le voyageur lui-même qui risque d'apporter des microbes dans le métro. Les mesures d'hygiène ne sont pas alors spécifiques à la RATP : ce sont celles qui doivent être respectées dans tout lieu public.

1.1.6. Les odeurs

Parmi les caractères de l'atmosphère du métro, les odeurs forment celui qui est le plus indéfinissable. On parle souvent de l'odeur du métro sans bien savoir ce que cela représente. En fait comme toute odeur, l'odeur du métro

est formée par un certain nombre d'émanations de corps divers qui se mélangent pour donner une odeur globale. On ne peut éliminer une odeur qu'en en imposant une autre. (C'est le cas pour les parfums où le remplacement est direct puisqu'il suffit que l'odeur ajoutée soit plus intense que celle qui existait auparavant, c'est le cas aussi des désodorisants actifs qui par diminution de l'intensité de l'odeur du composant jugé le plus désagréable font ressortir le caractère des autres composants qui jusqu'alors était masqué par l'odeur la plus désagréable.)

Les principales sources d'odeur du métro sont les suivantes :

- les huiles et les graisses utilisées pour le bon fonctionnement du matériel roulant et dont l'échauffement provoque parfois des odeurs peu agréables ;
- l'échauffement de la poussière, dont il a été question ci-dessus, en général provoqué par des câbles ou des moteurs électriques (cette odeur se rapproche de celle que l'on peut sentir lors

de la mise en route d'un radiateur électrique) ;

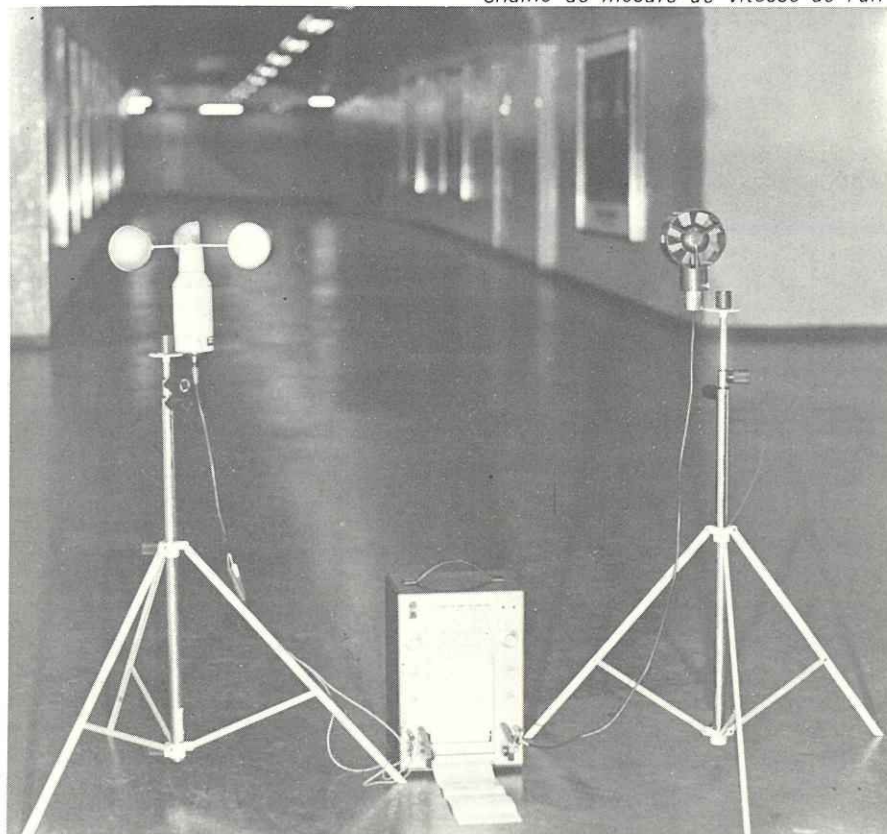
- les odeurs corporelles qui rassemblent aussi bien les odeurs de transpiration que les parfums ;
- l'ozone dont la présence en faible quantité a déjà été mentionnée ci-dessus.

Parmi les sources d'odeurs temporaires et localisées on peut citer les travaux de gros œuvre effectués en tunnel. En particulier les produits d'injection, utilisés pour renforcer le terrain autour d'un ouvrage, peuvent parfois réapparaître au niveau de celui-ci et engendrer temporairement des odeurs fortement désagréables.

1.2. Les paramètres physiques d'état de l'air

Les paramètres d'état de l'air sont sa température sèche, sa température de rayonnement, son degré hygrométrique et sa vitesse.

Chaîne de mesure de vitesse de l'air



1.2.1. La température sèche

C'est la température telle qu'on peut la lire sur un thermomètre normal ; elle caractérise la température du mélange gazeux que constitue l'air. Dans l'enceinte du métro, elle dépasse rarement les valeurs extrêmes de 0 °C et 35 °C et pendant les 9/10 de l'année, la température moyenne des lignes est comprise entre 20 °C et 28 °C.

En règle générale, la température moyenne journalière d'une station est supérieure à la température extérieure moyenne du même jour. A l'heure actuelle, des relevés périodiques sont effectués par des agents de la RATP au milieu du quai de chaque station, en l'absence de train pour éviter les fluctuations liées au passage des trains, et cela entre 14 et 16 heures car de nombreuses mesures ont montré que cette

température représentait d'une manière assez bonne la température moyenne journalière de la station (les températures extrêmes étant atteintes entre 18 et 20 heures pour les maxima et 4 et 5 heures pour les minima). On remarquera cependant qu'un gradient de température existe dans de nombreuses stations entre différents points d'un quai à cause de la proximité d'un couloir de sortie ou d'une baie d'aération. Le choix du milieu du quai pour effectuer la mesure permet dans la plupart des cas d'obtenir des résultats reflétant assez bien le comportement thermique moyen de la station.

Les valeurs T ainsi mesurées sont comparées à la température extérieure moyenne T_e du jour de la mesure. On effectue alors une approximation en supposant que l'écart $T - T_e$ varie linéairement en fonction de la température extérieure pour une période relativement homogène (températures extérieures comprises entre 10 et 22 °C). Cette approximation est légitime car il existe une bonne corrélation entre la température extérieure et la température intérieure comme en témoigne la figure a de l'annexe 1.

On dispose alors d'une droite d'équation $T - T_e = a T_e + b$ caractérisant chaque station pour la période chaude de l'année. On peut alors comparer les différentes stations pour la valeur de 22 °C de T_e qui correspond à une journée pouvant être considérée comme parmi les plus chaudes de l'année (en moyenne sur 20 ans cette température n'est dépassée que pendant 5 % du temps).

L'illustration de cette méthode de contrôle est donnée en annexe.

La figure 1 montre le résultat global de la campagne de mesure de 1975.

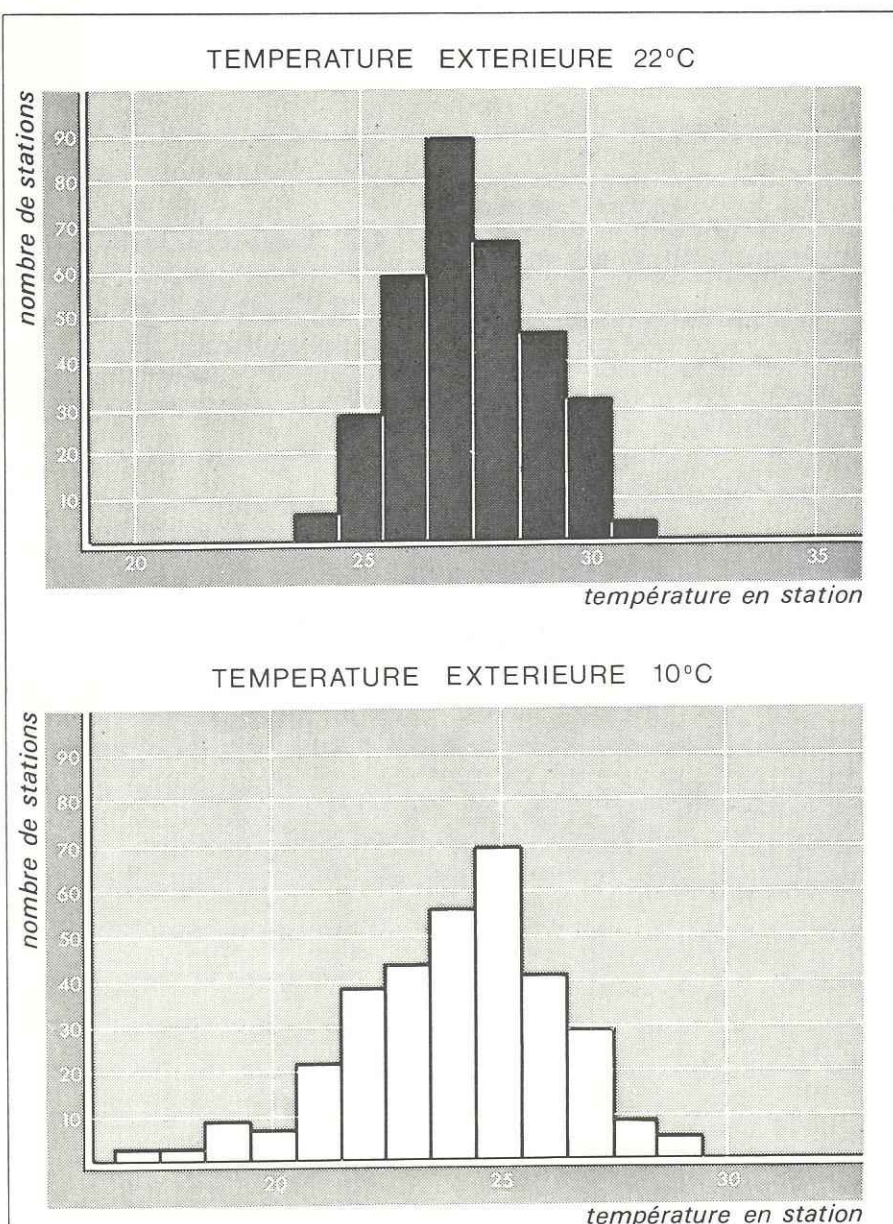


Fig.1 - Résultats de l'année 1975 : nombre de stations souterraines ayant une température donnée pour une température extérieure de 22°C et de 10°C

1.2.2. La température de rayonnement

Un corps placé au centre d'un local échange avec les parois de celui-ci une certaine quantité d'énergie sous forme de rayonnement. Un thermomètre à boule noire permet de tenir compte de ces échanges et donne une température qui, pour une température des parois très différente de celle de l'air du local, peut être assez différente de celle lue au thermomètre sec. Dans les sta-

Fig.2 - Diagramme psychrométrique de l'air
Zones de confort d'après Yaglou pour l'air calme

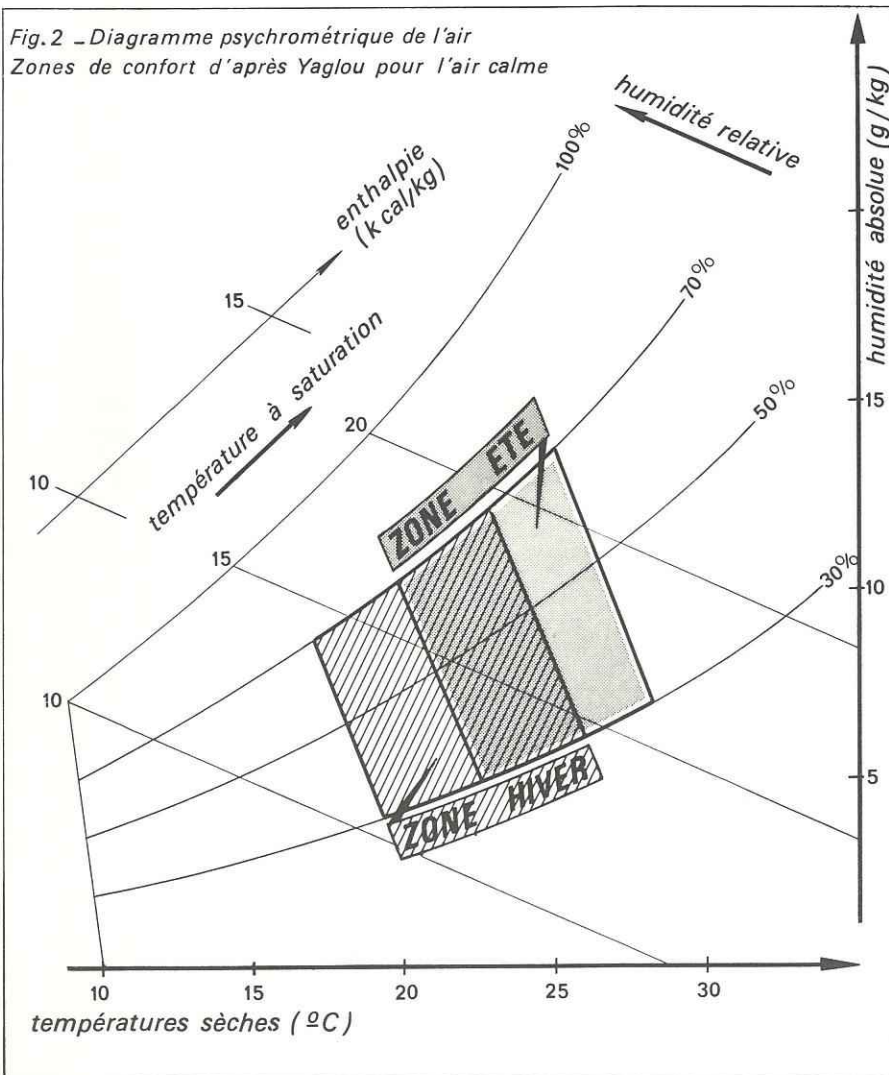


Fig.3 - Rame de métro circulant en tunnel



tions souterraines du métro ce phénomène n'est pas très important du fait d'un écart trop faible entre la température des parois et la température de l'air mais dans les rames circulant en aérien ce fait peut jouer une valeur non négligeable dans la sensation des voyageurs.

1.2.3. L'humidité de l'air

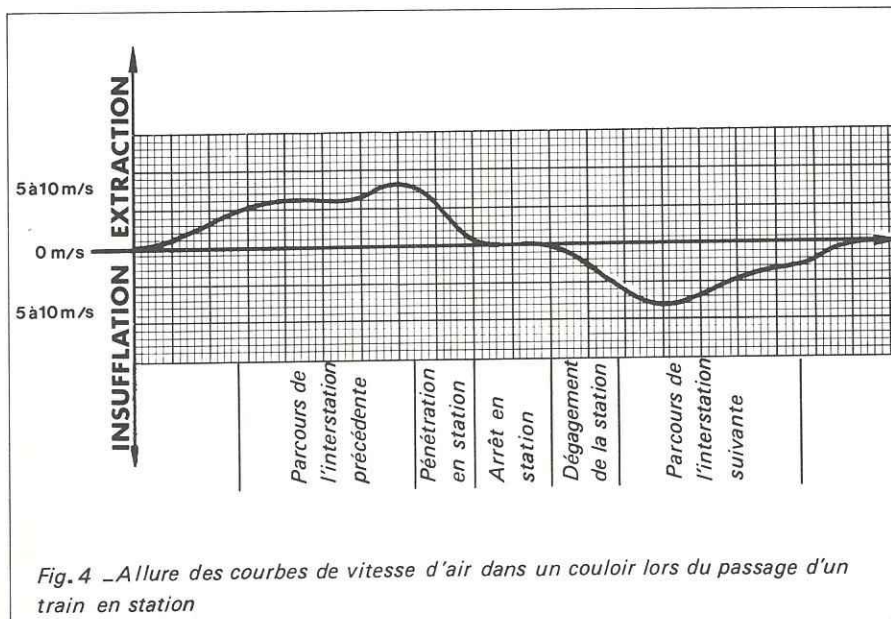
L'humidité relative ou degré hygrométrique est le rapport de la pression de vapeur d'eau dans l'air à la pression de vapeur saturante pour cette température. L'humidité absolue est le poids d'eau par kilogramme d'air sec. La température humide est la température d'évaporation dans l'air. Une quelconque de ces trois valeurs permet d'en déduire les deux autres quand on connaît la température sèche, grâce au diagramme psychrométrique (cf. figure 2). Dans le métro, l'humidité relative est très voisine de l'humidité relative extérieure. Elle n'atteint que très rarement des valeurs supérieures à 70 % ou inférieures à 30 %. Pourtant, surtout à bord des trains, en période très sèche, l'humidité peut descendre en dessous de 25 %, ce qui peut provoquer une gêne certaine pour les voyageurs.

1.2.4. La vitesse de l'air

L'air du métro est très souvent en mouvement. L'essentiel du brassage de l'air est provoqué par la circulation des trains d'une part, par la ventilation d'autre part ; le reste est dû aux mouvements naturels de convection liés aux différences de température et de pression.

La ventilation provoque des vitesses d'air d'environ 1 m/s en tunnel, et de l'ordre de 1 à 3 m/s dans les couloirs d'accès, dont le sens et la direction sont constants.

Du fait que la section frontale des trains occupe environ 1/3 de la section du tunnel (voir fig. 3), le mouvement des trains provoque des courants d'air qui peuvent être parfois violents. C'est l'effet de piston. Sur le quai les mouvements d'air sont tourbillonnants et varient entre 0 et 5 m/s ; dans les accès les mouvements d'air sont alternatifs (extraction d'air à l'arrivée d'un train en station, insufflation lors de son départ) et peuvent quelquefois dépasser



10 m/s (cf. fig. 4). De plus ils sont d'autant plus forts que la section de passage de l'air est rétrécie. C'est par exemple le cas de la station Louvre où, comme le montre la figure 5, les seuls couloirs d'accès sont vraiment de faibles dimensions.

1.3. La notion de confort thermique

Le corps humain échange de la chaleur avec le milieu qui l'environne par la respiration pulmonaire, par convection sur la surface exposée à l'air, par conduction à travers les vêtements, par rayonnement avec les surfaces de l'environnement lorsque celles-ci sont à une température différente de la température du corps. Chaque paramètre étudié plus haut a son importance dans l'équilibre thermique du corps. Le confort thermique est approché quand l'activité du système de régulation corporelle est la plus faible possible. A l'opposé, l'inconfort se traduit par des réactions qui peuvent être brutales (frisson en cas de froid, sudation importante en cas de chaud). Il est certain aussi que la sensation de confort dépend de l'activité (on peut plus facilement supporter le froid en cas de dépense musculaire intense) et de l'habillement (garder son manteau dans les voitures donne une impression de chaleur encore plus forte que si on l'ôtait).

La figure 6 représente très grossièrement les différents processus qui interviennent dans la sensation de confort. Remarquons que la variation de chaque paramètre peut avoir une influence

Fig. 5 - Couloirs d'accès à la station (Louvre)



sur le schéma global. En ce qui concerne le métro une enquête réalisée en 1974 et poursuivie en 1975 a permis de montrer que les facteurs les plus importants étaient la température, jugée souvent trop chaude (bien qu'en période froide les voyageurs apprécient souvent de trouver dans le métro une température très supérieure à la température extérieure) et les courants d'air et cela d'autant plus que la température extérieure est fraîche. De plus, les voyageurs semblent trouver que les problèmes de l'atmosphère du métro (chaleur, courants d'air, odeur) sont importants mais passent après les problèmes de bruits et les difficultés dues à l'affluence.

Le bruit, l'affluence et l'atmosphère du métro sont, avec la pénibilité des accès (escaliers et longueur des couloirs) ceux qui figurent le plus dans les gênes dont se plaint le voyageur. C'est donc pour cela que la Régie a entamé de vastes opérations pour améliorer le confort des voyageurs : construction d'escaliers mécaniques, augmentation du nombre de places offertes, amélioration de la ventilation. Dans le chapitre suivant nous allons étudier les moyens mis en œuvre pour tout ce qui a trait à l'atmosphère du métro.

1.4. Les objectifs de la Régie

Les paragraphes précédents montrent que le milieu dans lequel évolue le voyageur a une grande influence sur la sensation qu'il éprouve. Comme pour toutes les améliorations qu'elle a décidé d'entreprendre, la RATP s'est fixé des objectifs, et elle se rapporte à un certain nombre d'indicateurs pour mesurer l'écart qui sépare la situation actuelle de ce qu'elle sera lorsque l'objectif sera atteint.

Objectif n° 1 – En été la température moyenne journalière en station souterraine ne doit pas excéder de plus de 5 °C la température moyenne extérieure du même jour quand celle-ci est égale à la température moyenne du mois le plus chaud de l'année.

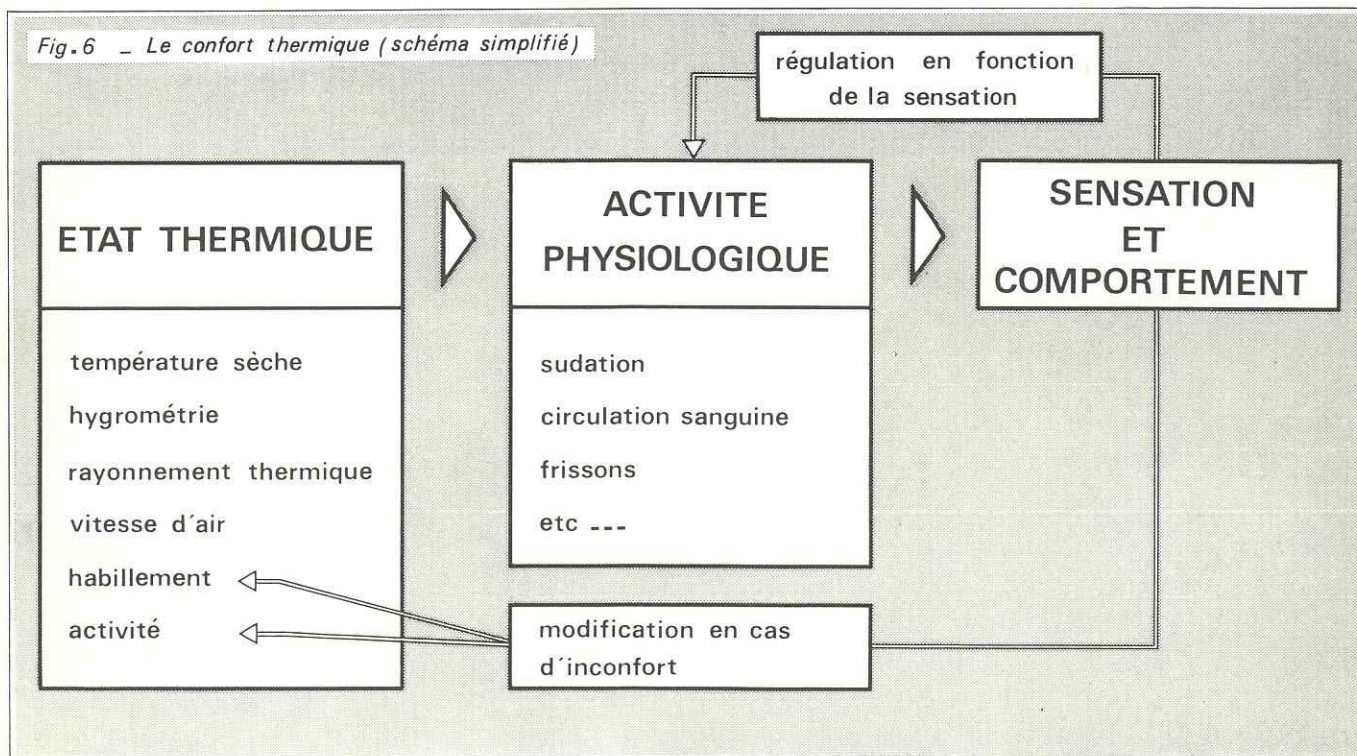
Objectif n° 2 – La ventilation doit assurer au moins quatre renouvellements de l'air du tunnel par heure.

Objectif n° 3 – Les vitesses d'air dans les parties publiques souterraines ne doivent pas dépasser 5 m/s en pointes de durée inférieure à vingt secondes et 4 m/s en régime établi.

Objectif n° 4 – Le pourcentage de vapeur d'eau dans l'air doit rester compris entre 30 et 70 %.

Ces quatre objectifs sont des objectifs prioritaires. Ils ne sont pas tout à fait indépendants les uns des autres du fait que la satisfaction du premier entraîne souvent celle du deuxième et du quatrième. De plus la satisfaction d'un de ces quatre objectifs peut entraîner des améliorations dans des domaines connexes : par exemple l'objectif n° 2 de confinement a pour but principal la limitation des teneurs en gaz carbonique, mais il entraîne en même temps la diminution du taux microbien, des odeurs et de la température. Notons enfin que des objectifs relatifs à l'amélioration du service tels que la diminution du nombre de voyageurs au m² ont aussi une influence sur l'atmosphère du métro, puisqu'ils interviennent directement sur le confinement et le confort thermique dans les trains. C'est pour cela que la RATP s'efforce de considérer simultanément tous les aspects du confort afin que dans l'amélioration de la qualité de son service, aucun ne soit négligé. Des enquêtes auprès des voyageurs permettent de mieux saisir leurs aspirations et les services d'études de la Régie font la synthèse des possibilités techniques pour dégager les actions les plus souhaitables et les plus souhaitées.

Fig. 6 – Le confort thermique (schéma simplifié)



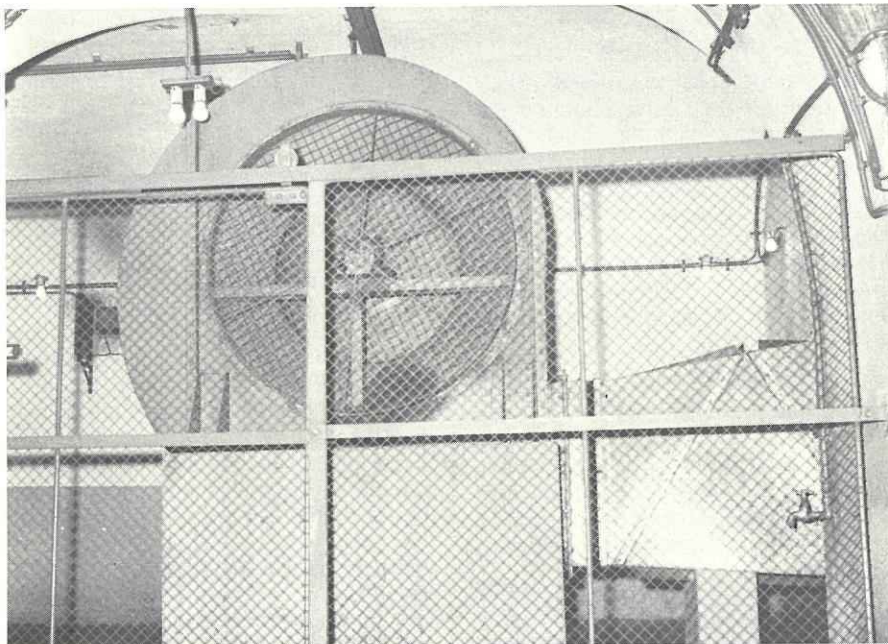


Fig. 8 _ Ventilateur centrifuge irréversible de faible débit ($9\text{m}^3/\text{s}$)

Chapitre II

Situation actuelle des équipements de traitement d'air

2.1. Métro urbain

La ventilation mécanique du métro est en cours de renforcement pour répondre aux deux objectifs de diminution de la température et d'assainissement de l'atmosphère. Le principe de ventilation retenu pour le métro urbain est le suivant : des ventilateurs hélicoïdes réversibles sont placés en tunnel à peu près au milieu de l'interstation. En été ces ventilateurs fonctionnent à plein rendement en extraction, l'air frais étant appelé par les accès des stations environnantes. En hiver ces venti-

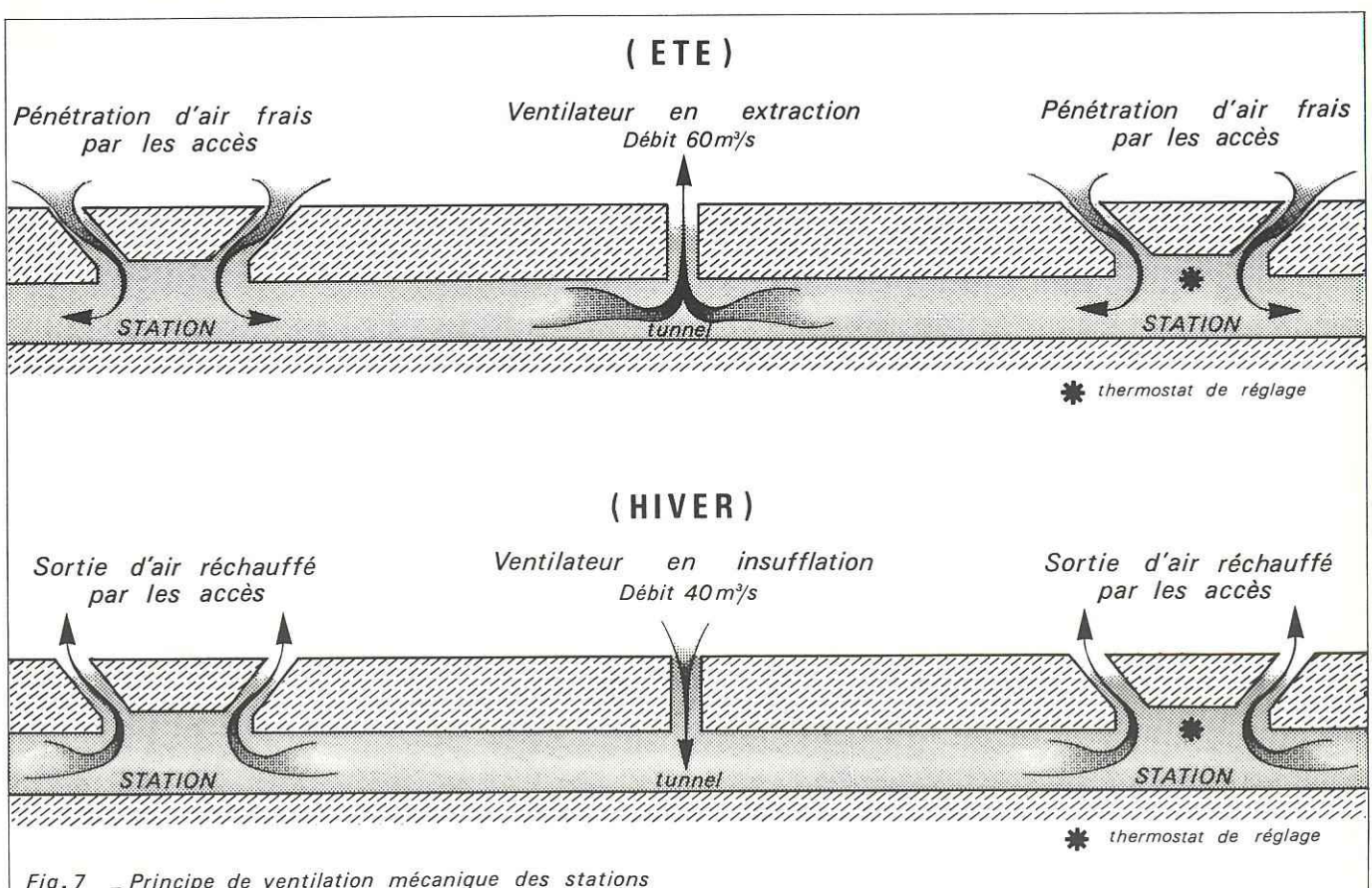


Fig. 7 _ Principe de ventilation mécanique des stations

lateurs fonctionnent en insufflations avec un débit égal à 60 % du précédent, l'air plus chaud du tunnel étant repoussé en station pour fuir par les accès sans créer de courants d'air froid sur les voyageurs. Les ventilateurs sont asservis à un thermostat installé au milieu de la station qui coupe le circuit d'alimentation électrique du ventilateur quand la température intérieure descend en dessous de 18 °C et le remet en marche quand la température remonte au-dessus de 21 °C. On trouvera sur la figure 7 l'illustration de ce principe de ventilation.

Avant 1967 des ventilateurs non réversibles de faible débit (voir fig. 8) étaient déjà en fonctionnement sur certaines portions de lignes mais leur efficacité s'est rapidement trouvée insuffisante ce qui explique que beaucoup aient dû être renforcés. Au 1-1-67 il y avait sur le réseau 102 ventilateurs de faible débit (en moyenne 9 m³/s) ce qui représentait un débit total de l'ordre de 900 m³/s. Entre le 1-1-67 et le 1-1-76 une centaine de ventilateurs réversibles (voir fig. 9) de débits compris entre 30 et 60 m³/s a été installée parfois en modifiant des ouvrages anciens, portant le débit total à 5 390 m³/s.

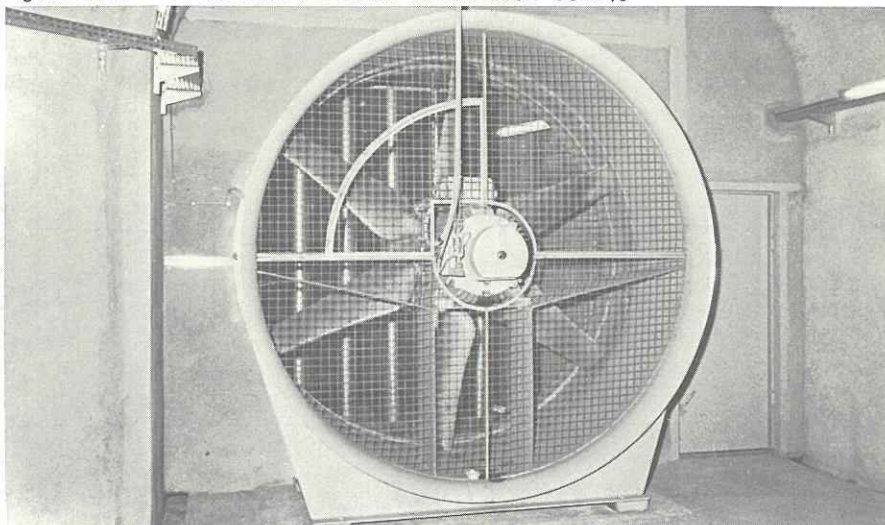
Rien qu'au cours de l'année 1975, quinze ventilateurs de 60 m³/s ont été réceptionnés alors que dans le même temps, vingt-cinq vieux ventilateurs devenus mal adaptés étaient déposés. Le débit total installé passait alors de 4 750 m³/s à 5 390 m³/s.

Pour caractériser de façon succincte la ventilation actuelle du métro urbain,

nous en avons rassemblé les principaux éléments caractéristiques dans deux tableaux.

Le premier tableau relatif à l'état de la ventilation au 1-1-76 montre bien la répartition des ventilateurs sur l'ensemble du réseau avec par exemple les situations extrêmes des lignes 2 et 3, la première n'étant pas ventilée, la se-

Fig. 9 _ Ventilateur hélicoïde réversible de fort débit 60 m³/s



Etat de ventilation au 1.1.76

Ligne	Longueur souterraine km	Nombre de ventilateurs à fort débit		Nombre de ventilateurs à faible débit		Nombre total	Débit total approx. m³/s
		$d \geq 60 \text{ m}^3/\text{s}$	$60 > d \geq 30$	$30 > d \geq 10$	$10 > d$		
1	14,6	8	8	7	1	24	890
2	10,1	—	—	—	—	0	0
3	11,6	8	14	6	3	31	1 300
4	10,6	5	14	1	—	20	820
5	10	—	—	—	8	8	70
6	7,6	6	—	—	—	6	360
7	15,4	7	11	—	1	19	860
8	17,6	3	—	—	1	4	190
9	19,5	4	4	—	—	8	390
10	9,7	—	—	—	4	4	40
11	6,3	—	—	—	1	1	10
12	13,8	1	3	—	—	4	180
13	5,8	3	—	—	1	4	190
14	4,6	1	—	—	3	4	90
Ensemble du réseau souterrain	157,2	46	54	14	23	137	
Débit d'ensemble approximatif		2 760	2 160	270	210	5 390	

Légende : MP : Matériel pneu ;
 MF : Matériel fer type 1967 ;
 S : Matériel fer type SPRAGUE.
 (1) Matériels multiples : MF + S + Matériel articulé.
 (2) Débit négligeable.

Dissipation d'énergie électrique par km de ligne

Ligne	Matériel intervalle théorique		Débit en service m ³ /s		Dissipation d'énergie électrique par km	ΔT théorique sans ventilation	ΔT effectif °C	Gain théorique par la ventilation °C
			total	par km				
1	MP	95 s	920	63	1 230	10,1	6,1	4
2	S	100 s	—	—	820	6,9	6,9	—
3	MF	105 s	1 120	96	840	7,9	4,4	3,5
4	MP	90 s	860	81	1 540	12,6	6,6	6
5	S	105 s	(2)	—	615	4,9	4,9	—
6	MP	100 s	360	47	1 150	9,3	5,8	3,5
7	MF	95 s	860	56	1 015	8,1	4,1	4
8	MF/S	110 s	300	17	710	6,1	5,1	1
9	MF	95 s	280	14	1 077	8,5	7	1,5
10	(1)	145 s	(2)	—	490	3,9	3,9	—
11	MP	125 s	(2)	—	707	5,5	5,5	—
12	S	100 s	240	18	810	6,5	5,5	1
13	MF	110 s	60	10	715	≠ 4,6	4,6	<1
14	S	150 s	60	13	450	≠ 2,8	2,8	<1

conde ayant un débit proche de l'objectif de 100 m³/s/km. On remarquera que les ventilateurs de fort débit totalisent plus de 90 % du débit d'ensemble, dont 50 % pour les ventilateurs récents de 60 m³/s.

Le second tableau fait apparaître la dissipation d'énergie électrique par km

de ligne en fonction du matériel et de l'intervalle retenu, le débit installé et l'écart de température déduit des mesures.

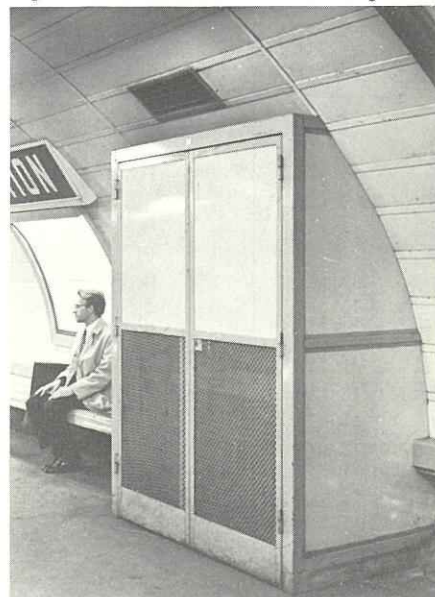
En supposant que l'écart de température soit proportionnel à l'énergie dissipée en ligne, on peut en déduire l'écart théorique sans ventilation et

donc le gain apporté par la ventilation. Si l'on considère les lignes 1, 4, 6, 7, 8, et 12, on obtient un gain de l'ordre de 0,7 °C pour 10 m³/s par km de ligne.

Fig.10_Ventilation de la station (Galliéni)



Fig.11 Armoire de ventilation réfrigérée



Bien que cette indication n'ait qu'une valeur relative, notons que sur la ligne n° 4, s'il n'y avait pas de ventilation on pourrait craindre une température moyenne de la ligne supérieure à 34 °C. On voit donc tout l'intérêt de poursuivre l'équipement en ventilation mécanique du réseau urbain pour éviter qu'une telle situation puisse se produire à la suite de l'augmentation du service sur une ligne. L'exemple de la ligne 9 le montre bien puisque la mise en service du nouveau matériel a entraîné une hausse de l'ordre de 2 °C de la température moyenne de la ligne.

Une solution originale de ventilation a été adoptée sur la ligne 3 au terminus Gallieni ; une gaine en sous-quai permet d'aspirer l'air au niveau des rhéostats de freinage des trains alors qu'une gaine en plafond permet d'insuffler de l'air frais en stations sans que l'esthétique de la station ne s'en ressente (voir fig. 10). Ce principe, efficace, pour un terminus moderne, ne peut malheureusement pas être envisagé pour des stations existantes.

En plus de la ventilation mécanique, des installations prototypes de réfrigération des stations par armoires individuelles ont fonctionné sur certains points chauds des lignes : Montparnasse, Vavin et Saint-Placide sur la ligne 4 et Châtelet sur les lignes 1 et 4. Actuellement sur la ligne 1, fonctionnant dans les stations Étoile et Nation deux petites centrales de production de froid avec des armoires de distribution sur les quais (voir fig. 11). De tels équipements n'ont pas pu être généralisés du fait du traitement trop local qu'ils apportent et du coût élevé d'équipement et d'entretien.

Enfin notons qu'une grande partie de l'aération du métro se fait encore à l'heure actuelle par des baies d'aération au nombre d'environ deux cents réparties de façon irrégulière sur le réseau. Sur le prolongement de la ligne 8 au-delà de la Marne, des baies d'aération de grande surface, et suffisamment nombreuses, permettent d'obtenir une atmosphère agréable sans qu'il soit besoin de ventilation mécanique. Ce n'est malheureusement pas le cas général.

La RATP a participé à l'étude et à la réalisation de plusieurs métros à l'étranger. Parmi ceux dont l'exploitation a déjà débuté – Montréal, Mexico, Santiago – les techniques d'aération ou de ventilation adoptées dérivent direc-

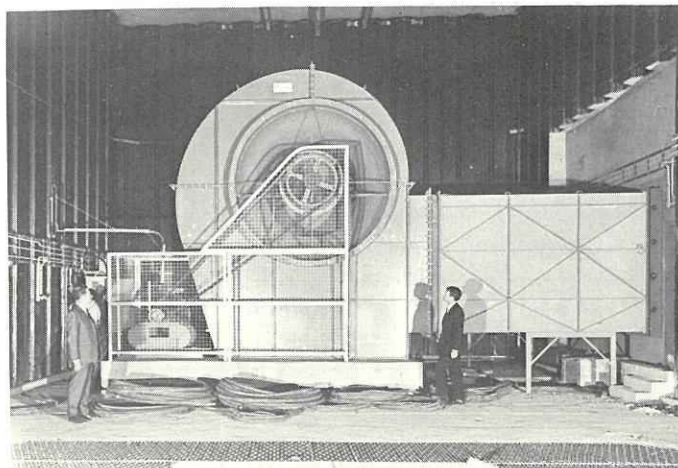


Fig. 12 – Ventilateur centrifuge du métro régional

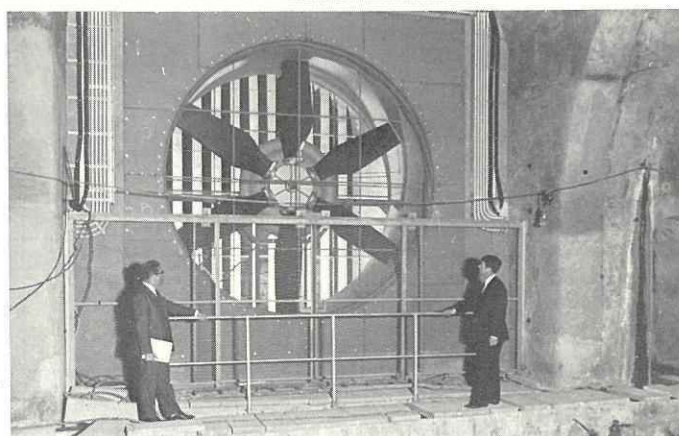


Fig. 13 – Ventilateur hélicoïde du métro régional

tement des réalisations qui ont été faites à Paris. Ainsi, l'équipement par des baies d'aération de grande surface utile (30 à 40 m²) réparties tous les 200 m environ, sur les lignes de Santiago du Chili, reprend le principe de la solution adoptée sur le prolongement de la ligne n° 8 entre Alfort – École Vétérinaire et Maisons-Alfort – Les Juilliottes mentionné ci-dessus.

2.2. RER

Le RER (métro régional) a fait l'objet dès sa conception d'une étude rationnelle de la ventilation. Trois aspects ont été traités :

- évacuation des calories produites en tunnel par la circulation des trains, ce qui a conduit à la ventilation longitudinale des lignes ;
- traitement de l'air des zones de circulation des voyageurs (quais, mezzanines, etc.), ce qui a conduit à adopter

le principe de la ventilation transversale des quais et de ventilation réfrigérée au niveau des salles d'échanges des grandes stations ;

- désenfumage des stations en cas de sinistre, ce qui a conduit à prévoir des équipements de sécurité capables d'extraire les fumées provoquées par un incendie éventuel. Ces installations ne devant servir qu'en cas de nécessité, ne participent pas à l'amélioration du confort des voyageurs. En effet, leur fonctionnement très bruyant serait mal adapté à une ventilation permanente.

Ventilation longitudinale des lignes.

Cette ventilation est assurée par de puissants groupes de ventilation répartis le long de la ligne et fonctionnant l'un en extraction, le suivant en insufflation et ainsi de suite, de façon à obtenir un balayage longitudinal du tunnel. Les figures 12 et 13 donnent une idée de la taille des équipements né-

cessaires. Le tableau suivant décrit l'état actuel de cette ventilation. Le traitement des nouveaux tronçons sera décrit dans le chapitre 3.

Ligne	Longueur souterraine approximative	Extraction		Insufflation	
		Ventil.	Débit	Ventil.	Débit
Nanterre-Auber	9 km	5	750 m³/s	5	650 m³/s
Vincennes-Nation	2 km	2	160 m³/s	1	90 m³/s

Traitement des stations.

Sur le tableau ci-après apparaissent les solutions qui ont été retenues pour les quais et les zones de circulation des stations du métro régional.

Station	Ventilation des quais	Traitement des salles d'échanges	Puissance frigorifique installée
Saint-Germain . .	Ventilation spéciale	Ventilation réfrigérée	130 000 fg/h
Nanterre Préf. . .	Ventilation normale du tunnel	Ventilation simple (possibilité d'addition ultérieure de réfrigération)	—
La Défense	Ventilation normale du tunnel	— (réfrigération des locaux techniques)	—
Etoile	Ventilation spéciale	Aération naturelle	—
Auber	Ventilation spéciale avec réfrigération de l'air recyclé	Ventilation réfrigérée de tout le complexe	6 000 000 fg/h
Nation	Ventilation spéciale avec réfrigération de l'air recyclé	Ventilation réfrigérée	900 000 fg/h

Les figures 14, 15 et 16 donnent un aperçu des installations de réfrigération de la station AUBER.

Désenfumage.

Tous les équipements précédents

A l'heure actuelle l'atmosphère du métro régional est agréable. Conçue pour absorber les calories correspondant à une exploitation beaucoup plus intense, qui interviendra avec l'interconnexion RATP - SNCF, la ventilation assure une très bonne tenue en température des stations. Seule la station Auber présente en ce moment un léger inconfort par suite des odeurs provoquées par la résurgence de certains des produits d'injection utilisés massivement pour la construction de la station ; mais ce phénomène est très localisé et temporaire et la situation devrait redevenir normale dans les mois à venir.

Un seul objectif n'est pas respecté, c'est celui de la limitation des vitesses d'air. Le phénomène d'effet de piston, déjà fort ressenti sur le métro urbain, prend une importance d'autant plus grande que les vitesses de circulation sont plus grandes et que certaines parties de la ligne sont constituées de tunnels à voie unique. Des remèdes diminuant l'intensité des courants d'air sont à l'étude ; ils ne seront appliqués que si les installations prévues sur le tronçon central donnent satisfaction lors de la mise en service.

présentent la possibilité d'être utilisés pour le désenfumage en cas d'incendie. Des équipements supplémentaires sont installés là où l'action des équipements de ventilation est insuffisante (par exemple : grande salle de La Défense).

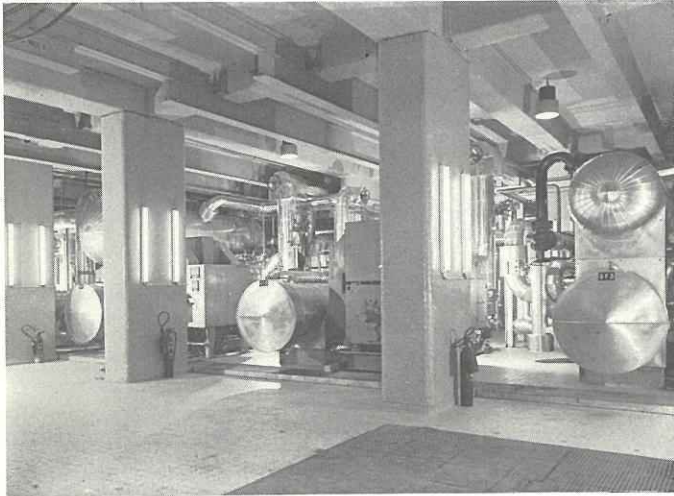


Fig. 14_ Salle des installations de réfrigération

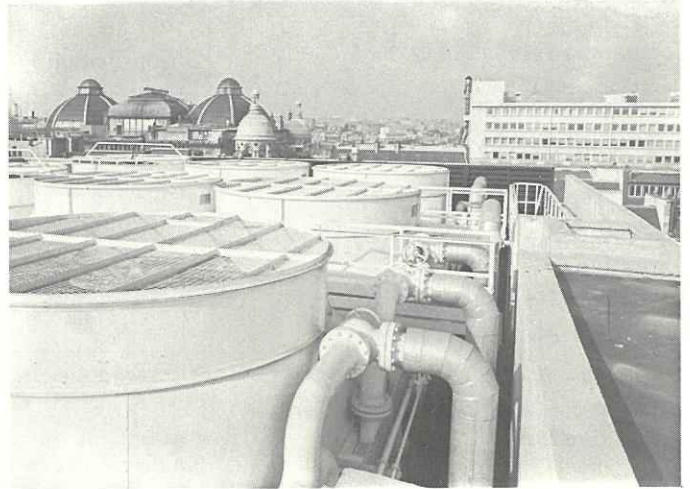
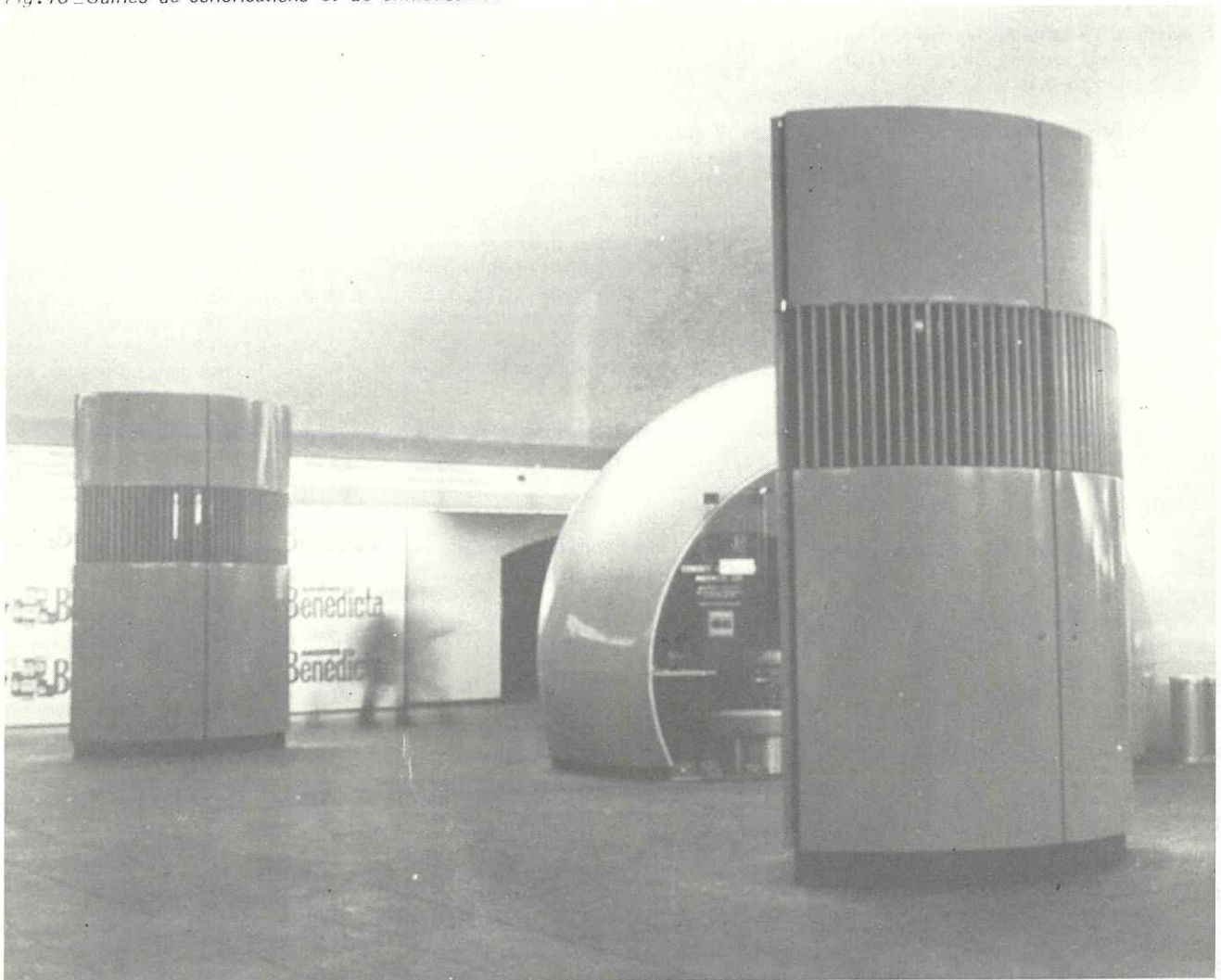


Fig. 15_ Aérocondenseurs

Fig. 16_ Gains de sonorisations et de climatisation



Chapitre III

Les moyens mis en œuvre pour améliorer l'atmosphère du métro

3.1. Amélioration de la ventilation

3.1.1. Traitement des lignes existantes du métro urbain

La régie a, dans son plan d'entreprise, réservé une grande place à l'amélioration de la ventilation du métro existant. Le tableau des opérations qu'elle a prévu pour les années 1976 à 1981 le montre bien :

Ces prévisions ont été établies en tenant compte du fait qu'un ouvrage de ventilation de 60 m³/s à créer représente un investissement de 2,6 MF aux conditions économiques de 1976, et que le remaniement d'une baie d'aération ou d'un poste de ventilation de trop faible débit coûte en moyenne 1,3 MF.

Il faut pour construire un poste neuf

Année d'engagement	Année de réalisation	Montant en millions de francs hors taxe	Nombre d'ouvrages
1975	1976	36	17
1976	1977	61,6	26
1977	1978	35	15
1978	1979	26	11
1979	1980	25	11
1980	1981	30	12
Période 76-81		213,6	92

Opérations prévues de 1976 à 1981

environ un an d'études préalables (étude technique, demande d'autorisation auprès de la voirie et des services concessionnaires) puis environ dix mois de travaux dont huit mois pour le génie civil. L'engagement financier étant pris après la réalisation des études et juste avant la mise en chantier, la mise en service des ventilateurs s'effectue environ un an après son engagement.

Le programme adopté correspond donc à la mise en service de 92 ventilateurs entre 1976 et 1981.

Ce programme n'est pas figé car il est directement lié aux prévisions d'exploitation du réseau ferré et aux possibilités de financement de la Régie. En effet, en première approximation, le débit de ventilation nécessaire pour équiper une ligne est proportionnel à la

puissance électrique consommée en heure de pointe pour la traction des rames de métro. Or la puissance consommée est inversement proportionnelle à l'intervalle existant entre deux rames de métro, et donc le débit est inversement proportionnel à l'intervalle en heure de pointe. Si, par exemple on applique un intervalle de 1 mn 50 s au lieu de 1 mn 30 s, le débit nécessaire à l'évacuation des calories diminue d'environ 20 %.

Pour en tenir compte la réalisation du programme est ajustée chaque année à la mise au point des prévisions de trafic.

Vers 1981 les objectifs relatifs à la température et au renouvellement de l'air seront pratiquement atteints, comme le montre le tableau ci-dessous

Quelques opérations ponc-

Débits prévus en fonction de la consommation

Ligne	Matériel prévu	Intervalle prévu (s)	Consommation de puissance prévue en tunnel (kW)	Débit prévu (m ³ /s)	Écart de température prévu (°C)
1	Pneu	100	20 600	1 240	# 5
2	Fer à récupération	100	8 000	480	# 5
3	Fer	100	11 300	1 120 (1)	# 3
4	Pneu	100	17 600	1 060	# 5
5	Fer à récupération	105	6 300	380	# 5
6	Pneu	100	10 100	600	# 5
7	Fer à récupération	95	13 050	800	# 5
8	Fer à récupération	105	13 600	800	# 5
9	Fer	110	18 200	1 100	# 5
10	Fer	145	4 650	300 (2)	# 4,5
11	Pneu	110	6 300	380	# 5
12	Fer	110	11 600	700	# 5
13/14	Fer à récupération	95	14 500 (3)	520	# 5

(1) Débit existant en 1975.

(2) Débit nécessaire au renouvellement d'air.

(3) Dont 8 600 dans la zone de ligne ancienne à rénover.

tuelles resteront alors à prévoir pour les points particuliers où la température serait encore trop élevée ou l'aération insuffisante. (Notamment dans les stations de correspondance importante.)

3.1.2. Traitement des prolongements de ligne du métro urbain

Les nouvelles lignes sont équipées d'une ventilation forcée analogue à celle qui est en cours d'installation sur les lignes existantes, complétée par la création de baies d'aération de part et d'autre des stations jouant le rôle de cheminées d'équilibre. Le débit nominal installé est environ de 100 m³/s par kilomètre de voie double.

3.1.3. Traitement du RER

Le principe déjà adopté sur les tronçons en service est conservé même sur les parties comprenant des tunnels à voie unique. Les ouvrages de ventilation souvent couplés avec les postes d'épuisement des eaux sont implantés en général dans les puits de service nécessaires à la construction du tunnel, ce qui permet de réduire au minimum leur coût.

La ventilation du tunnel de jonction des lignes est et ouest comportera 2 ventilations d'extraction d'un débit total de 400 m³/s et 3 postes d'insufflation correspondant à 600 m³/s pour environ 5,5 km de souterrain. On retrouve un débit de l'ordre de 100 m³/s par km de ligne.

Pour ce qui est de la jonction Luxembourg-Châtelet d'une longueur d'environ 2,2 km, un poste d'extraction et un poste d'insufflation de 200 m³/s, en assureront la ventilation longitudinale.

3.2. Diminution de la chaleur dissipée en tunnel

La RATP envisage pour les rames dont elle va faire l'acquisition à partir de 1977 d'équiper systématiquement les motrices de ce nouveau type de matériel en équipements de récupération d'énergie. Les progrès de l'électrotechnique ont permis en effet de concevoir un système qui transforme une partie de l'énergie de freinage en énergie électrique renvoyée sur le réseau pour assurer la marche en traction des autres trains en ligne.

Cette technique permet de diminuer de 15 % l'énergie calorifique dissipée en ligne et d'améliorer ainsi les conditions ambiantes. Certains matériels du type MF 67 qui sont mis en service cette année sont déjà équipés d'un tel système de récupération. Le remplacement des contrôleurs de démarrage à rhéostats par un système de contrôle à semi-conducteurs devrait de plus permettre un gain de 10 à 15 % d'énergie au démarrage en évitant sa dissipation dans les résistances de démarrage. En 1981, les lignes 2 et 5 devraient être équipées pour la récupération au freinage et les lignes 7, 8 et 13 pour la récupération au freinage et l'économie d'énergie dissipée au démarrage.

L'adoption de ces systèmes a été prise comme hypothèse de base pour l'établissement du programme de ventilation. Il faut souligner que si la récupération n'était pas mise en place le débit de ventilation à installer sur ces lignes serait à augmenter dans les proportions correspondantes.

3.3. Climatisation des stations

La climatisation n'est pas une solution applicable pour le métro parisien à caractère urbain, en raison de l'importance du volume d'air à traiter et du grand nombre de stations. Il n'en est pas de même, pour les stations du métro régional dont certaines salles sont mieux isolées. L'équipement en ventilation réfrigérée des grandes stations va donc se poursuivre par le traitement des stations Châtelet et Gare de Lyon qui sera le suivant :

- ventilation des quais de façon à obtenir un taux de renouvellement de l'ordre de 8 fois par heure ;
- réfrigération des mezzanines et des locaux techniques par un raccordement à une centrale extérieure traitant le quartier des Halles qui fournira 1 000 000 fg/h à la station Châtelet et par la création d'une centrale de froid d'une puissance de 1 200 000 fg/h pour la station Gare de Lyon.

Ces projets tiennent bien entendu compte du trafic prévu lorsque sera réalisée l'interconnexion des réseaux SNCF et RATP.

3.4. Climatisation des rames de métro

Les statistiques ont montré que le

voyageur passe en moyenne les 2/3 du temps total de son déplacement à l'intérieur des voitures et seulement 1/3 dans les accès et sur les quais. L'amélioration de la qualité de l'air dans les stations est insuffisante pour que, par les échanges de chaleur par convection ou conduction, les conditions dans les voitures soient tout à fait confortables. En effet l'aération des anciennes voitures se fait par des lanterneaux au sommet de la caisse dont l'efficacité est fonction de la vitesse. (fig.17)

Pour les voitures modernes une amélioration va être apportée en assurant une ventilation mécanique de la voiture par des gaines de soufflage d'air. (fig.18 et 19)

Fig. 17. Aération des voitures par lanterneaux

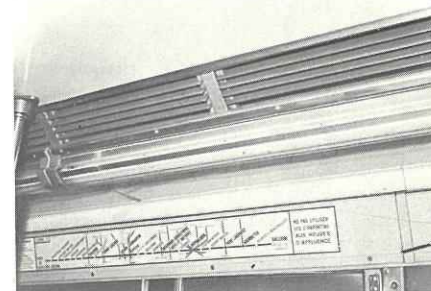


Fig. 18. Ventilation prototype par gaines

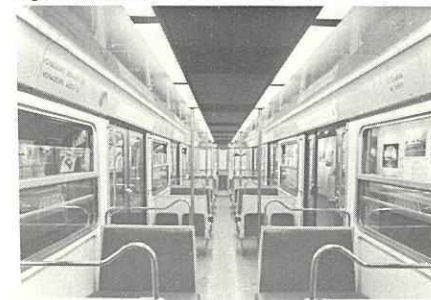


Fig. 19. Diffuseur plafonnier



Un meilleur renouvellement de l'air des voitures sera ainsi obtenu ; c'est le principe déjà adopté sur le métro régional qui est de plus équipé d'un dispositif de chauffage à air pulsé. Un avantage supplémentaire de cette solution est qu'elle permet une meilleure isolation acoustique. Elle a été retenue pour les trains MS 61 et elle sera reconduite pour les trains MI 79 destinés à l'interconnexion RATP-SNCF.

Mais cette étape paraît insuffisante et la RATP a mis à l'étude une climatisation des voitures dont deux prototypes ont déjà été réalisés. La nouvelle génération de matériel du type MF 77 comportera toutes les mesures conservatoires nécessaires à la mise en place d'une climatisation. Les huit premiers trains de ce type sont commandés et seront livrés avec leurs équipements de ventilation réfrigérée.

3.5. Cheminées d'équilibre : lutte contre les courants d'air

La circulation de plus en plus rapide des trains entraînant des mouvements d'air de plus en plus intenses et prolongés, il fallait étudier des moyens de diminuer les effets les plus nocifs des courants d'air. Deux solutions théoriques sont envisageables : ou bien mettre des obstacles à la circulation de l'air entre les stations et l'extérieur, ou bien au contraire créer de nouvelles ouvertures par où le flux d'air s'échapperait entraînant une moindre fuite par les accès.

La première solution, un moment envisagée, présente le défaut de rendre l'accès des voyageurs plus pénible : la création de sas par multiplication des écrans de porte gêne la marche des voyageurs et de plus elle n'est pas efficace lors des heures d'affluence. En outre, cette solution conduit à créer un obstacle à la ventilation de la station et à diminuer fortement le renouvellement d'air des volumes souterrains.

La seconde solution à l'étude consiste à créer en station une cheminée d'équilibre d'une surface suffisante. L'amélioration peut aller jusqu'à une réduction de moitié de l'intensité des courants d'air mais le coût élevé des ouvrages en rendra la généralisation incertaine. En 1977 un prototype sera réalisé sur le métro urbain.

Un programme d'équipement du réseau en cheminées d'équilibre pour les points les plus critiques est actuellement à l'étude, mais en tout état de cause il ne pourra pas démarrer avant les années 1980.

En ce qui concerne le métro régional, des solutions originales ont été prévues pour le tronçon central en construction. Les stations Châtelet et Gare de Lyon seront protégées par des cheminées d'équilibre profilées quand cela est possible (voir fig.20) et les portions à

Le nettoyage des stations est effectué tous les jours par balayage humide ; pour les stations importantes, ce nettoyage est effectué trois fois par jour. Une fois par mois, les stations sont lavées de nuit et cette fréquence est portée à deux fois par mois pour les stations importantes. Lors du nettoyage des sols on utilise un produit désodorisant et désinfectant, à base d'ammonium quaternaire, dont les caractéristiques sont vérifiées à chaque livraison par le laboratoire de la RATP.

Fig. 20 Cheminée d'équilibre



voie unique seront réunies par des rameaux d'équilibre qui empêcheront les différences de pression accompagnant le mouvement du train de prendre des valeurs critiques.

3.6. Le nettoyage et les autres moyens de lutte contre les odeurs, les poussières, les microbes.

Plusieurs actions sont menées par la Régie pour nettoyer les stations et le tunnel. Un train dépoussiéreur spécial permet de nettoyer le ballast. La force d'aspiration a été calculée de façon que le ballast ne soit pas entraîné mais que les déchets et les papiers qui le jonchent (surtout en station) soient aspirés et envoyés dans des filtres importants placés dans des wagons de part et d'autre de l'équipement d'aspiration.

Les puisards et les rigoles de circulation d'eau sont curés périodiquement et traités à l'aide de désinfectants.

En ce qui concerne les odeurs, des petits appareils désodorisants ont été installés dans une quinzaine de stations. Ces appareils diffusent dans l'atmosphère du métro un gaz obtenu par évaporation d'huiles essentielles aromatiques. Ces produits ont des vertus bactéricides qui viennent s'ajouter aux actions de parfumage normales des appareils. L'expérience n'a pas été étendue par suite du caractère trop localisé de l'action des appareillages.

En ce qui concerne les poussières, les ventilateurs d'insufflation d'air dans les stations du métro régional sont équipés de filtres à déroulement automatique pour améliorer la qualité de l'air dans les zones de circulation.

Il est certain que l'amélioration de la qualité de l'atmosphère du métro ne peut être réalisée que si ces mesures d'hygiène sont appliquées; il faut noter toutefois qu'elles ne trouvent leur pleine efficacité que dans la mesure où les utilisateurs respectent eux-mêmes une discipline minimale.

3.7. Les actions prospectives

Les différents services d'étude et d'équipement de la RATP concernés par les problèmes relatifs à l'atmosphère du métro recherchent des moyens et des méthodes nouvelles pour améliorer encore sa qualité, et font appel pour cela à des organismes spécialisés : le Centre d'études bioclimatiques de Strasbourg effectue actuellement, sous la direction du Professeur Metz, pour le compte de la RATP, une étude scientifique des effets des conditions climatiques sur des usagers du métro. A l'aide d'une enquête importante accompagnée d'une campagne de mesures physiques, les chercheurs du CNRS espèrent pouvoir trouver les corrélations qui existent entre les sensations des voyageurs, leur comportement et les conditions climatiques auxquelles ils sont soumis. Cette étude permettra d'affiner les objectifs choisis en leur faisant perdre leur aspect un peu arbitraire.

Sans attendre les résultats de cette étude de longue haleine, d'autres actions sont menées pour étudier essentiellement les phénomènes thermiques et aérodynamiques qui interviennent dans le métro. C'est le cas de l'étude aérodynamique de la station Louvre qui a été effectuée sous la direction du Professeur Fortier par la Faculté des Sciences d'Orsay. De même la société technique des fluides étudie pour le compte de la Régie un modèle mathématique des écoulements d'air dans la station Charles de Gaulle - Étoile. De plus elle a réalisé des maquettes hydrauliques des stations futures Châtelet et Gare de Lyon, qui ont permis de définir la politique à adopter pour diminuer les courants d'air.

Enfin sous la direction du Professeur Cordier, une étude a été confiée à de jeunes ingénieurs de l'ENSMA de Poitiers sur les échanges thermiques entre les rames et l'air du tunnel et entre ce dernier et le milieu qui l'environne. Toutes ces études ont pour objectif de donner les solutions théoriques à apporter pour améliorer les conditions

ambiantes dans le métro : certaines ont été adoptées parce qu'elles étaient généralisables sans entraîner d'investissements trop importants ; d'autres ne l'ont pas été, soit que leur efficacité ait été trop faible, soit que leur coût se soit révélé prohibitif. C'est le cas de la climatisation des stations du métro urbain qui ne sera pas poursuivie malgré le bon fonctionnement des centrales d'Étoile et de Nation, à cause des coûts importants d'investissement et surtout d'entretien qu'elle entraîne par rapport à la ventilation mécanique.

Dans les années à venir, la RATP va mettre en service un réseau de surveillance de l'atmosphère du métro, en collaboration avec le laboratoire d'hygiène de la ville de Paris. Des postes d'enregistrement de température, d'hygrométrie, et de teneur en gaz toxiques, seront installés sur un certain nombre de points caractéristiques du réseau. D'autre part un objet de centralisation du contrôle et des commandes de tous les ventilateurs est à l'étude. Il permettra, en fonction des indications du réseau de contrôle, d'obtenir un fonctionnement optimum de la ventilation en permettant les fonctions suivantes :

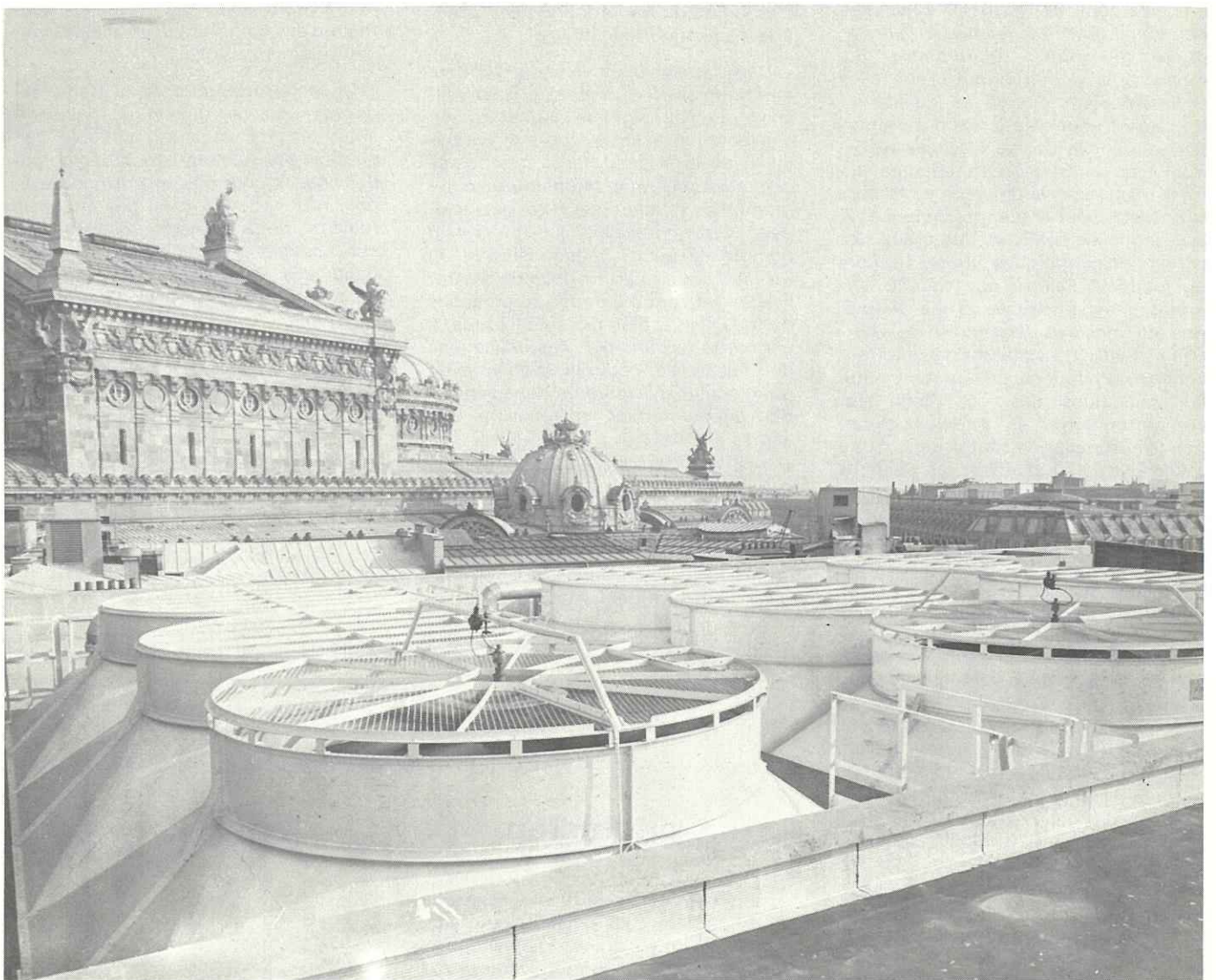
- détection immédiate des pannes et des irrégularités de fonctionnement ;
- réglage du fonctionnement suivant les conditions atmosphériques ;
- possibilité d'utilisation des ventilateurs pour le désenfumage ;
- utilisation exceptionnelles (travaux, incidents, etc.).

service public, la RATP a entrepris une action importante pour améliorer le confort des voyageurs. La construction d'une centaine de ventilateurs, la réalisation de cheminées d'équilibre, la climatisation de certaines salles d'échange des voyageurs du RER, le traitement d'air des voitures, la récupération d'énergie sont autant de volets d'une action qui vise au même but : rendre l'atmosphère du métro agréable en supprimant les températures excessives, en diminuant les courants d'air, en assurant un meilleur renouvellement de l'air.

La tâche prioritaire de la Régie est de procurer un moyen de transport aussi efficace et aussi agréable que possible aux habitants de la région parisienne. A côté des extensions de lignes, du renouvellement des matériels roulants, de la rénovation des stations, etc., l'amélioration du confort bioclimatique des voyageurs figure en très bonne place dans le plan d'entreprise.

Conclusion

La RATP assure la tâche essentielle pour l'économie de la capitale, de faire circuler quatre millions de personnes chaque jour dans le métro. Parmi ses clients la plupart sont des travailleurs astreints à l'utiliser pendant les heures d'affluence. La présence d'un aussi grand nombre de personnes, l'augmentation de température entraînée par la circulation des rames et bien d'autres aspects font que l'image du métro n'est pas aussi agréable qu'on pourrait le souhaiter. Soucieuse de son rôle de



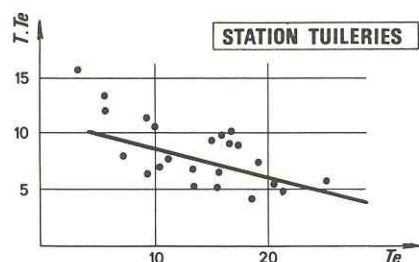
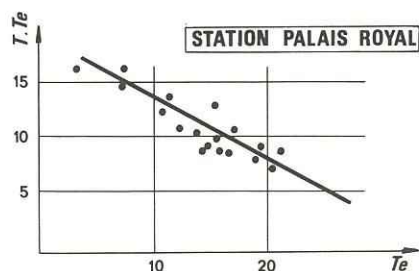
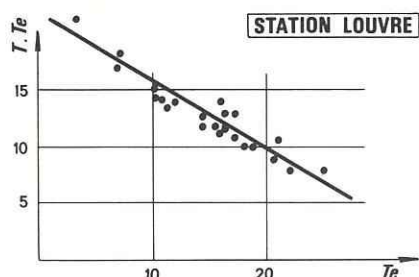
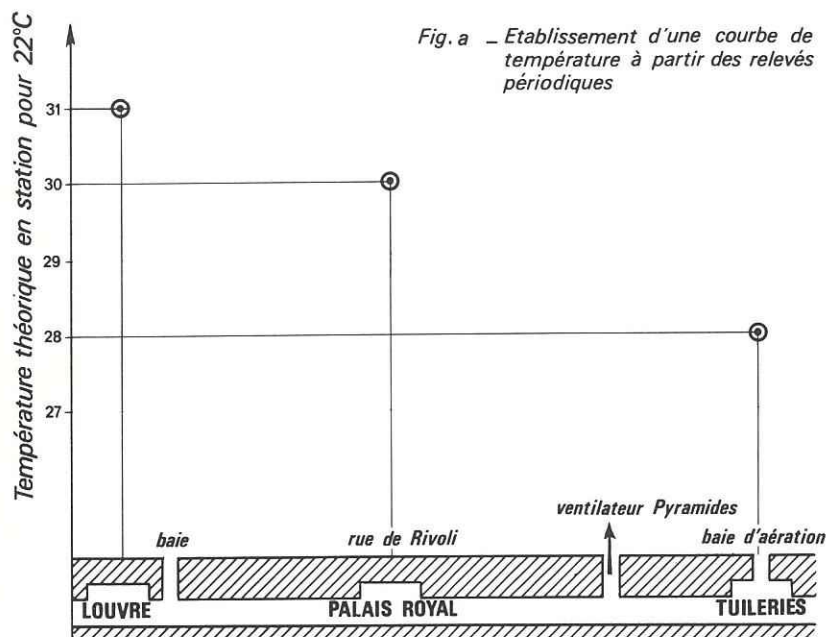
Aerocondenseurs à Auber

Annexe 1

Contrôle des températures du réseau urbain

Résultats de l'année 1975

Contrôle des températures du réseau urbain Résultats de l'année 1975



Légende :

T_e : Température extérieure (°C)

T : Température relevée en station (°C)

$T - T_e$: Ecart entre l'intérieur et l'extérieur (°C)

Cette annexe illustre le principe de contrôle retenu pour les températures des stations du métro, par des exemples concrets. La première figure (fig. a) montre l'établissement d'une courbe de température par ligne (réduite ici à la portion de la ligne n° 1 Louvre - Tuileries). On voit dans la partie gauche le rassemblement des points effectivement mesurés en fonction de la température moyenne extérieure du jour de la mesure. La droite représente en première approximation la station et il suffit de lire l'ordonnée correspondant à une température extérieure de 22 °C, pour trouver la température théorique qui est reportée sur le diagramme de droite. On remarquera que la station Louvre, très peu aérée, est très chaude quelle que soit la température extérieure, alors que la station Tuileries, très aérée, est relativement fraîche en été et presque froide en hiver.

La seconde figure (fig. b) montre la répartition par ligne des températures théoriques pour une température extérieure de 22 °C. On voit tout de suite que certaines lignes sont très chaudes comme la 4 et la 9, et d'autres très fraîches comme la 3 et la 14. Les lignes chaudes sont des lignes où la consommation en énergie de traction est importante et la ventilation trop faible. Les autres, au contraire, sont des lignes où la consommation est peu importante (ligne 14) ou bien la ventilation suffisante (ligne 3).

Ligne	Température moyenne (°C)	Température la plus élevée (°C)		Température la plus basse (°C)		Pourcentage de satisfaction de l'objectif
1	28,1	Louvre	31	Pte Vincennes	26,4	9 %
2	28,9	Pigalle	30,7	Pte Dauphine	26,8	10 %
3	26,4	Opéra	29	Pte Bagnole	24,5	72 %
4	28,6	Saint-Placide	30,3	Château-d'Eau	27	0 %
5	26,9	Gare de l'Est	27,9	Jaurès	25,7	67 %
6	27,8	Kléber	31,1	Bercy	24,7	33 %
7	26,1	Mairie d'Ivry	28,8	Pte de Choisy	24,4	74 %
8	27,1	Montmartre	29	Lourmel	24,6	41 %
9	29	Muette	30,4	Mairie Montreuil	27,5	0 %
10	25,9	Charles-Michel	27,9	Église Auteuil	23,9	75 %
11	27,5	Châtelet	29,9	Rambuteau	26,3	31 %
12	27,5	Lamarck	30	Solférino	25,4	25 %
13	26,6	Place Clichy	28,2	Saint-Lazare	25,5	62 %
14	24,8	Montparnasse	25,6	Invalides	23,6	100 %
Réseau	27,3	KLÉBER	31,1	INVALIDES	23,6	40 %

APPAREILS DE MESURES

Le tableau ci-dessus donne quelques caractéristiques plus précises qui complètent les résultats de la figure b (toujours pour une température extérieure de 22 °C).

La dernière figure (fig. c) montre, pour chaque ligne, la répartition des températures théoriques pour une température extérieure de 10 °C. Les stations où la température atteint des valeurs comprises entre 18 °C et 24 °C sont jugées convenables.

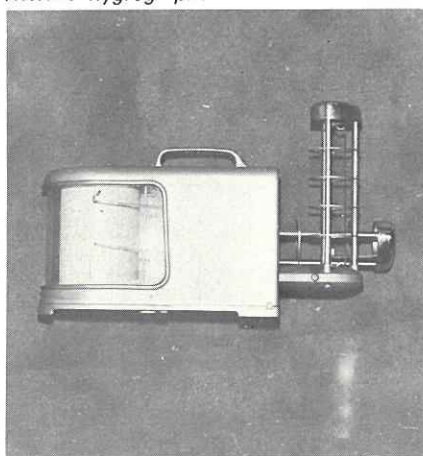
On constate qu'il y a deux stations trop froides, l'une Porte de Champerret sur la ligne 3 où la ventilation des positions de garage des trains entraîne une trop forte ventilation de la station, l'autre Bercy sur la ligne 6 qui est très proche de l'extérieur.

Pour ce qui est des températures excessives on retrouve des résultats semblables à ceux obtenus pour 22 °C, on notera que certaines stations où la température était de 30 °C pour 22 °C à l'extérieur ont encore une température de 29 °C pour 10 °C à l'extérieur.

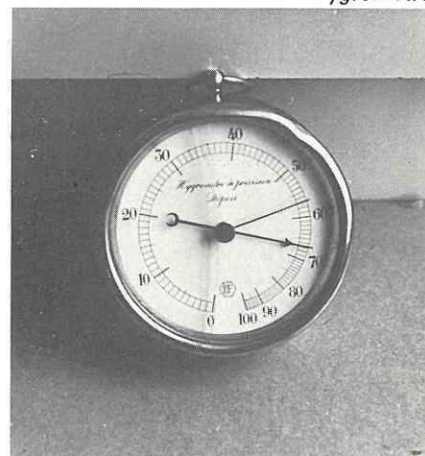
Enfin on remarquera par rapport aux valeurs de la figure b un étalement des températures surtout pour les lignes très ventilées qui apparaissent comme étant les plus confortables.

Les diagrammes hors texte joints, montrent les résultats obtenus ligne par ligne.

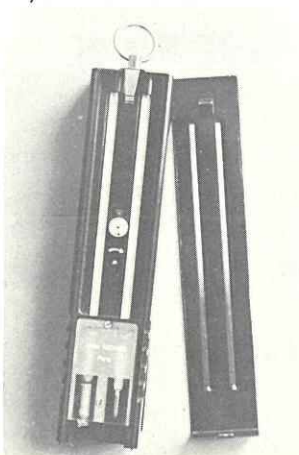
Thermo-hygrographe



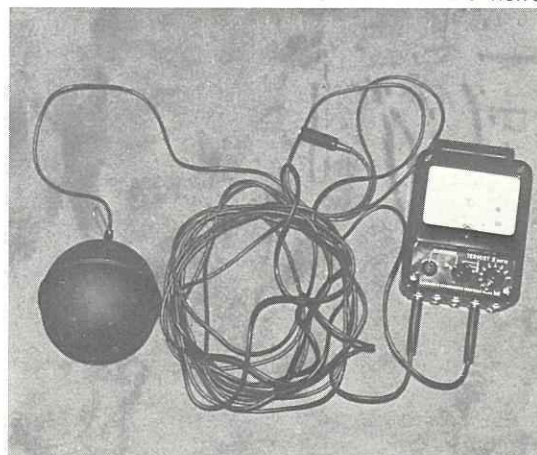
Hygromètre

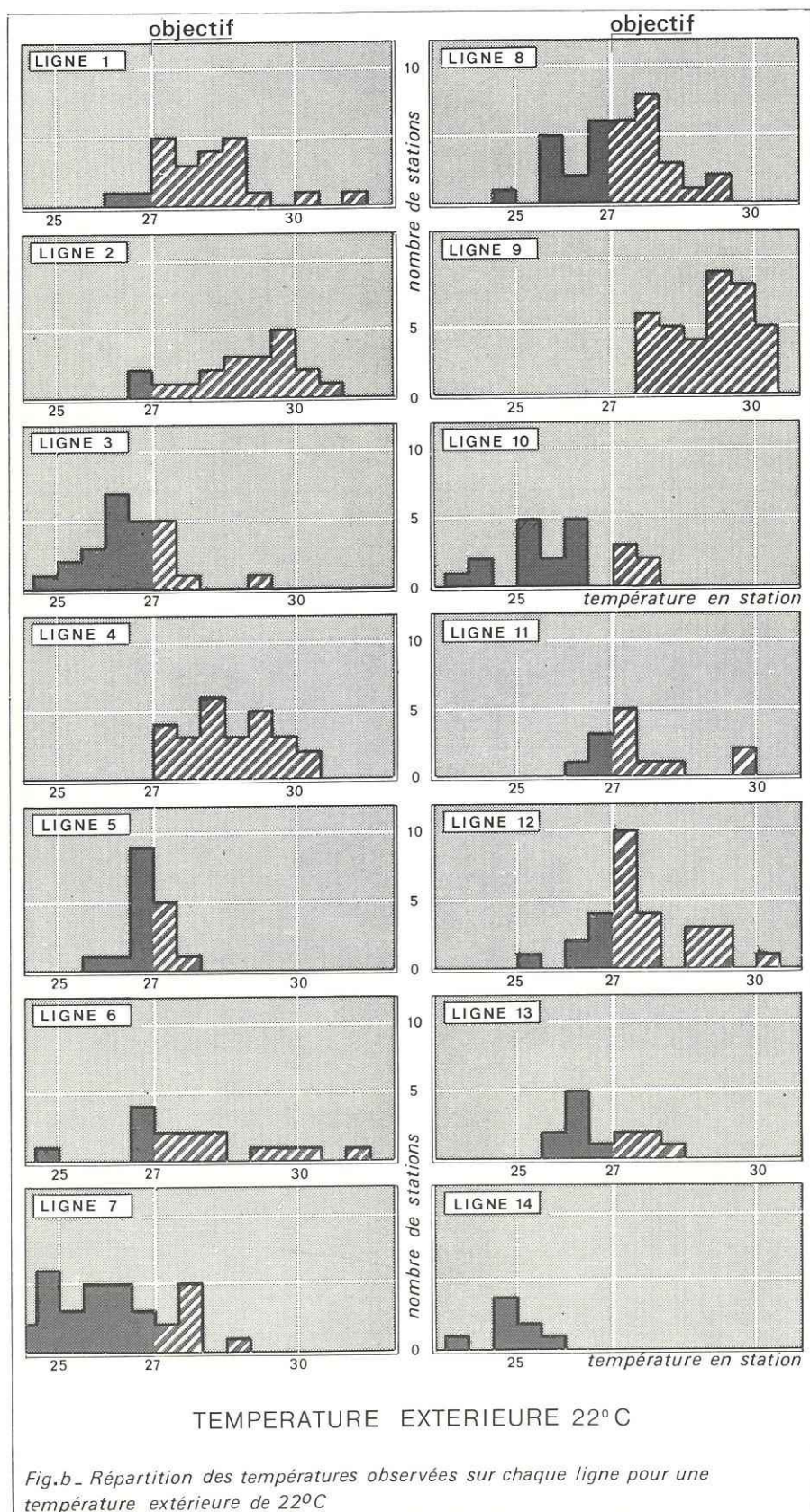


Psychromètre



Thermomètre à boule noire





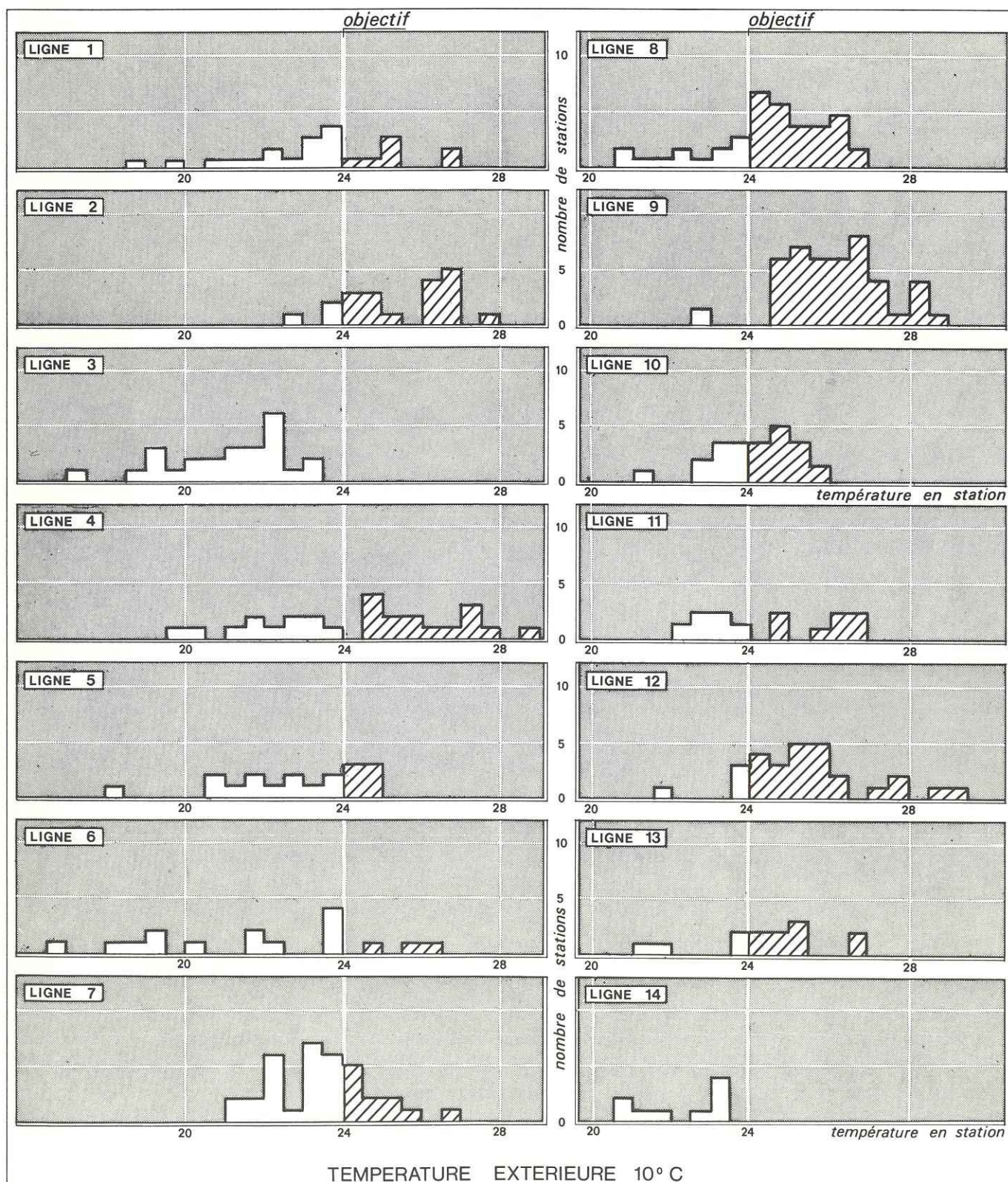
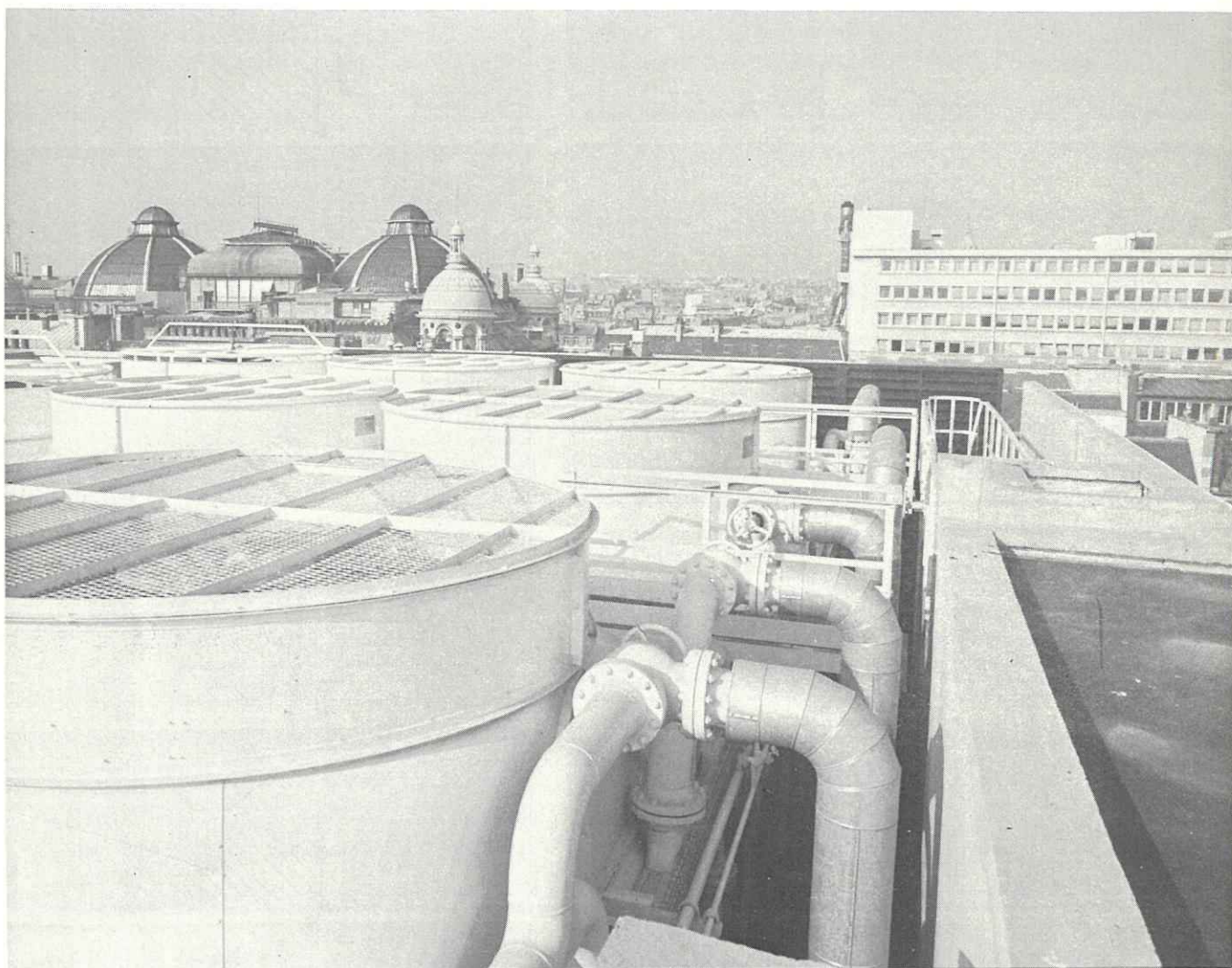


Fig.c - Répartition des températures observées sur chaque ligne pour une température extérieure de 10° C

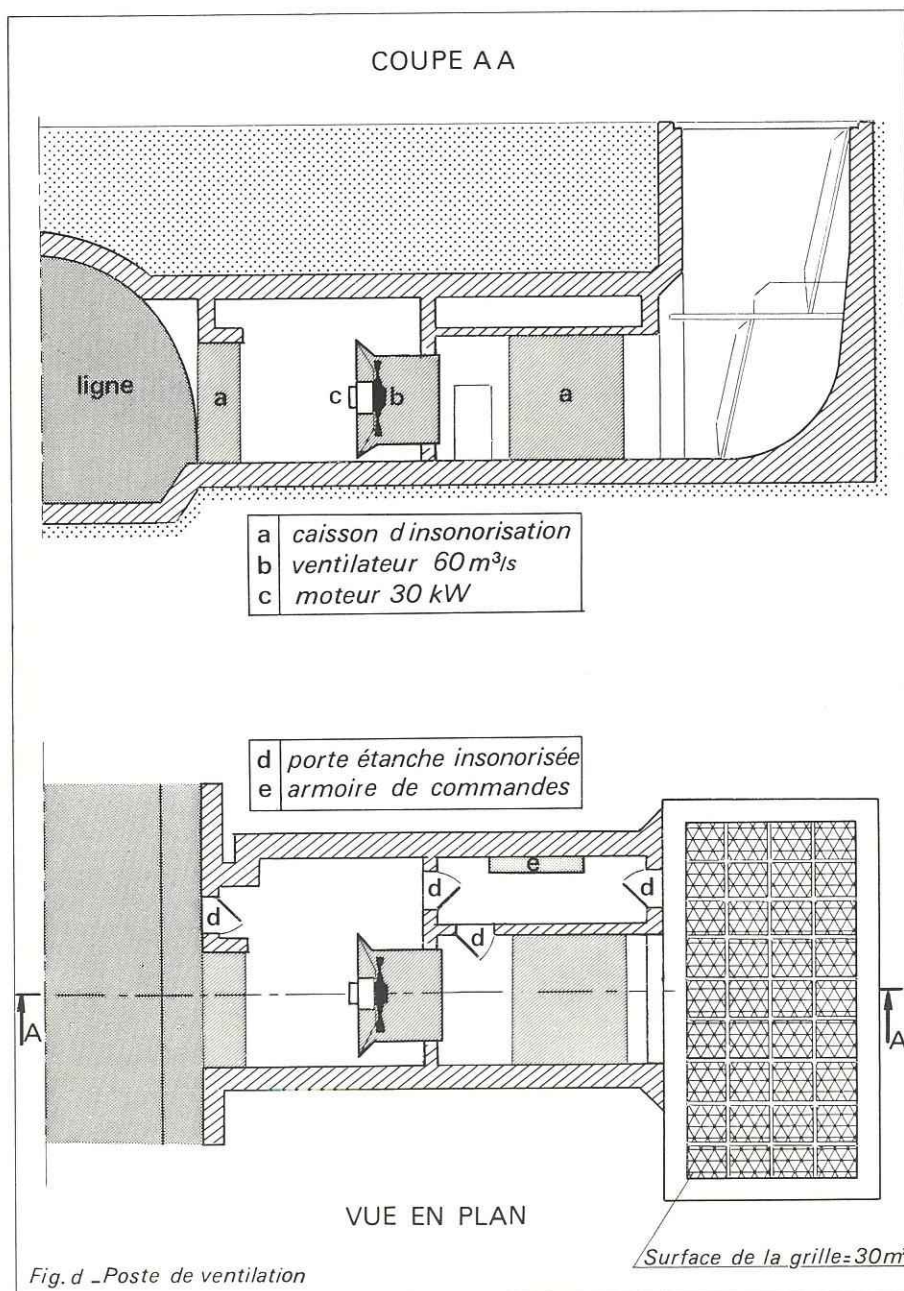


Aérocondenseurs d'Auber

Annexe 2

Réalisation technique d'un poste de ventilation

Réalisation technique d'un poste de ventilation



1. Étude

Les services d'études de la Régie, à l'aide d'un bilan thermique des lignes, définissent un programme d'équipement qui indique la nécessité de créer des ventilateurs dans certaines inter-stations. A ce moment une prospection est faite pour rechercher les endroits susceptibles d'être disponibles pour l'implantation d'une trémie de ventilation.

Un des impératifs les plus pressants est lié à la grille au niveau du sol. En effet les vitesses de sorties d'air ne peuvent dépasser 2 m/s pour un lieu passager, ce qui oblige à prévoir une grille de 30 m² pour un ouvrage de 60 m³/s. Dans certains cas favorables la cheminée de sortie peut être inscrite dans une zone où aucun passage de piétons ne peut avoir lieu, alors il est possible de multiplier la vitesse de sortie par 3 ou 4 et donc diminuer d'autant la section de passage nécessaire.

En fonction du plan type, figure d, les bureaux d'études préparent un ou plusieurs projets qu'ils communiquent alors à la Direction de la Voirie et à tous les services concessionnaires pour obtenir l'accord de réalisation.

2. Réalisation du gros œuvre

On peut distinguer trois parties dans un ouvrage de ventilation : la pénétration en tunnel, la chambre du ventilateur et la cheminée de ventilation. Les photos suivantes montrent certains aspects de ces différentes parties pendant les phases de construction.

Fig.e _Chambre du ventilateur



Fig.f _Support d'un ventilateur

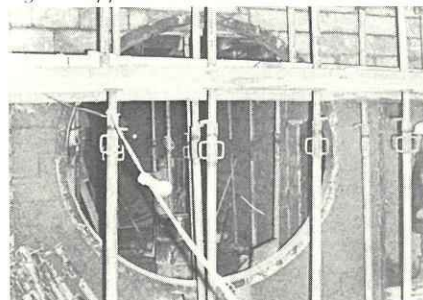


FIGURE e - chambre du ventilateur,
FIGURE f - support d'un ventilateur,
FIGURE g - cheminée de ventilation

Au niveau de la cheminée il peut parfois être nécessaire de procéder à des réalisations originales comme le montrent les exemples suivants.

1^{er} exemple : ouvrage Stanislas (ligne n° 4).

Pour respecter l'alignement des arbres sur le boulevard Montparnasse, une cheminée double a dû être édifiée.

Les figures h, i, j en montrent trois aspects.

2^e exemple : ventilation de la station Auber (fig. k).

La prise d'air se trouve dans un angle mort de cet important carrefour.

3^e exemple : ventilation Nordling (p.32)

Une solution heureuse sur le plan esthétique (fig. l).

3. Les équipements du poste de ventilation

Le groupe motoventilateur (voir fig. m) comprend en général une hélice de grand diamètre, un moteur à courant alternatif et un frein qui à l'arrêt du ventilateur empêche l'hélice de tourner sous l'effet de piston des trains.

Des caissons d'insonorisation parfois très importants permettent de réduire les nuisances sonores dues au groupe motoventilateur et sauf quelques cas particuliers, les riverains n'ont pas à se plaindre de la présence du ventilateur.

L'équipement de commande assure les fonctions suivantes, pour le fonctionnement normal du ventilateur :

- marche automatique avec thermostat ;
- marche forcée à partir du poste pour les opérations d'entretien ;
- marche forcée à partir de la station la plus proche pour utilisation en cas d'incendie ;
- signalisation des alarmes.

La maintenance des installations est assurée par les services d'entretien qui effectuent des visites de contrôle mensuelles de chaque poste et au moins une fois l'an une visite plus complète de révision. Les postes sont nettoyés périodiquement pour éviter l'accumulation des poussières, feuilles mortes, vieux papiers...



Fig. g - Cheminée de ventilation

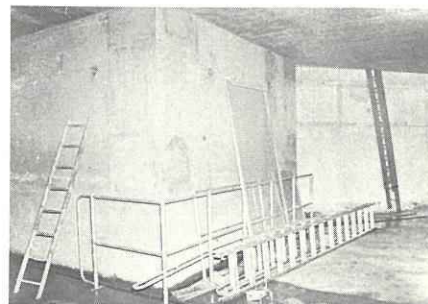


Fig. h - Cheminée double



Fig. i . . . en cours de réalisation



Fig. j . . . ouvrage terminé

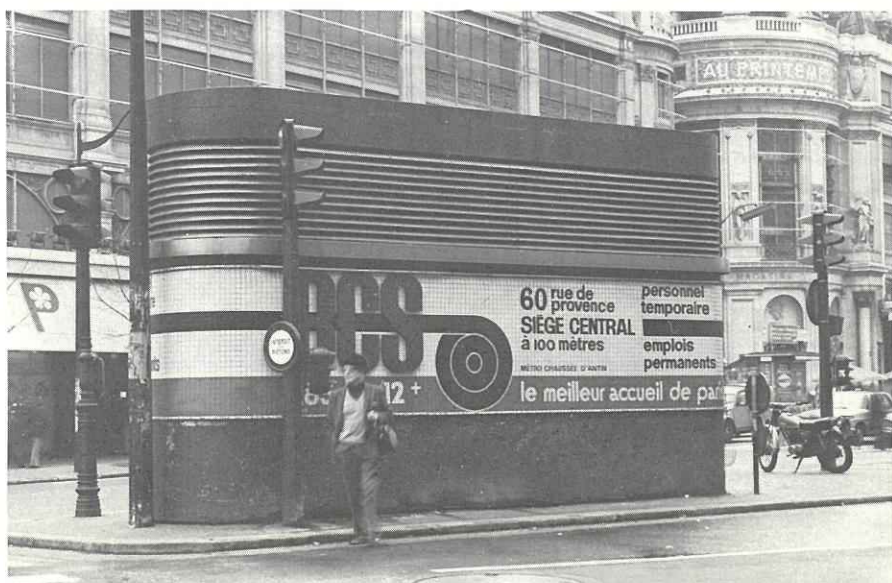


Fig. k - Ventilation de la station Auber

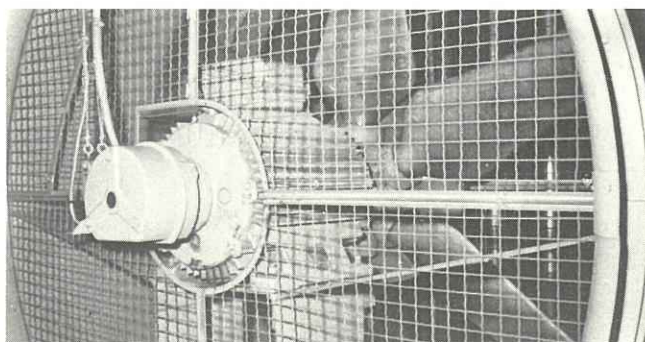


Fig. m - Hélice de grand diamètre et un moteur à courant alternatif d'un groupe motoventilateur

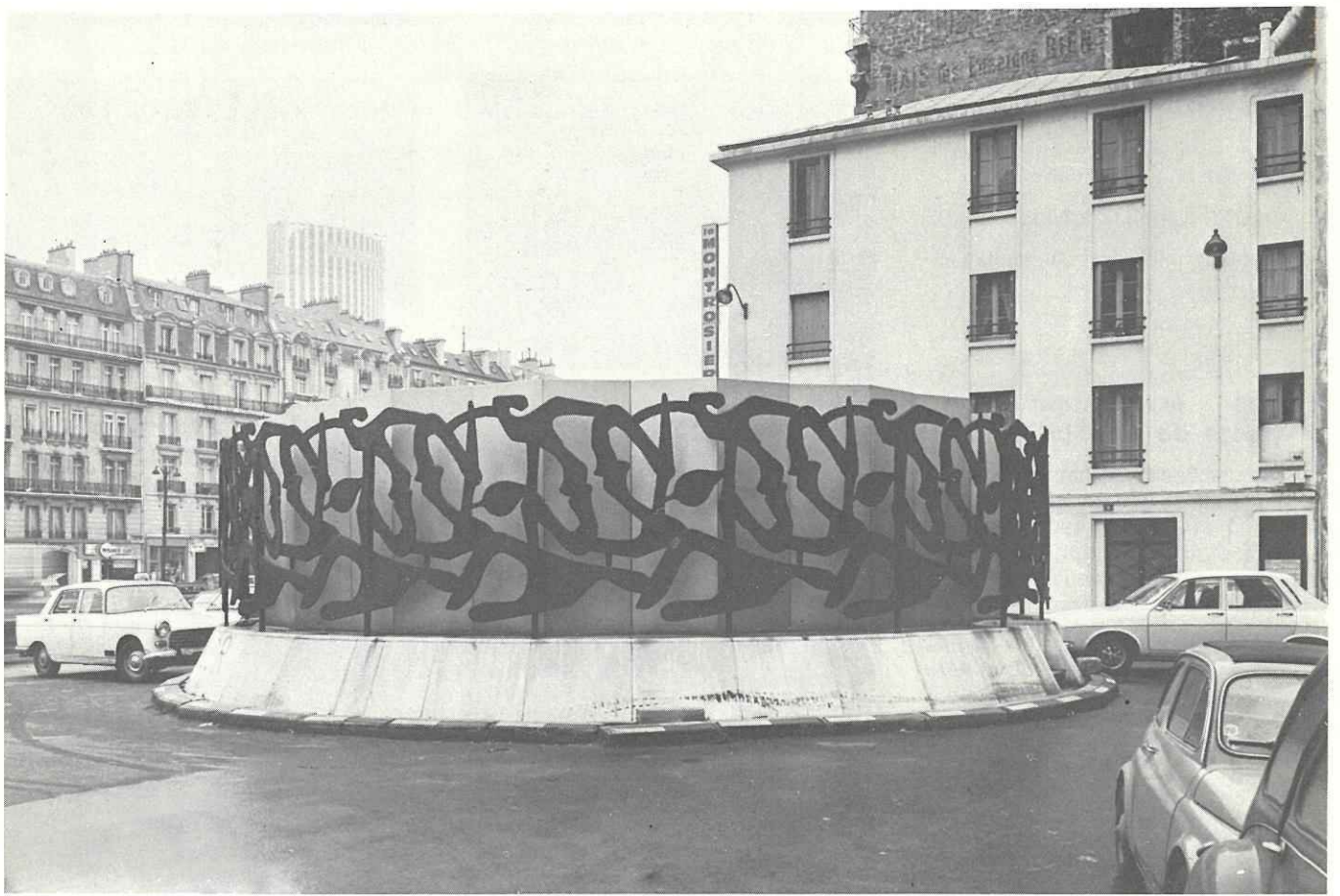
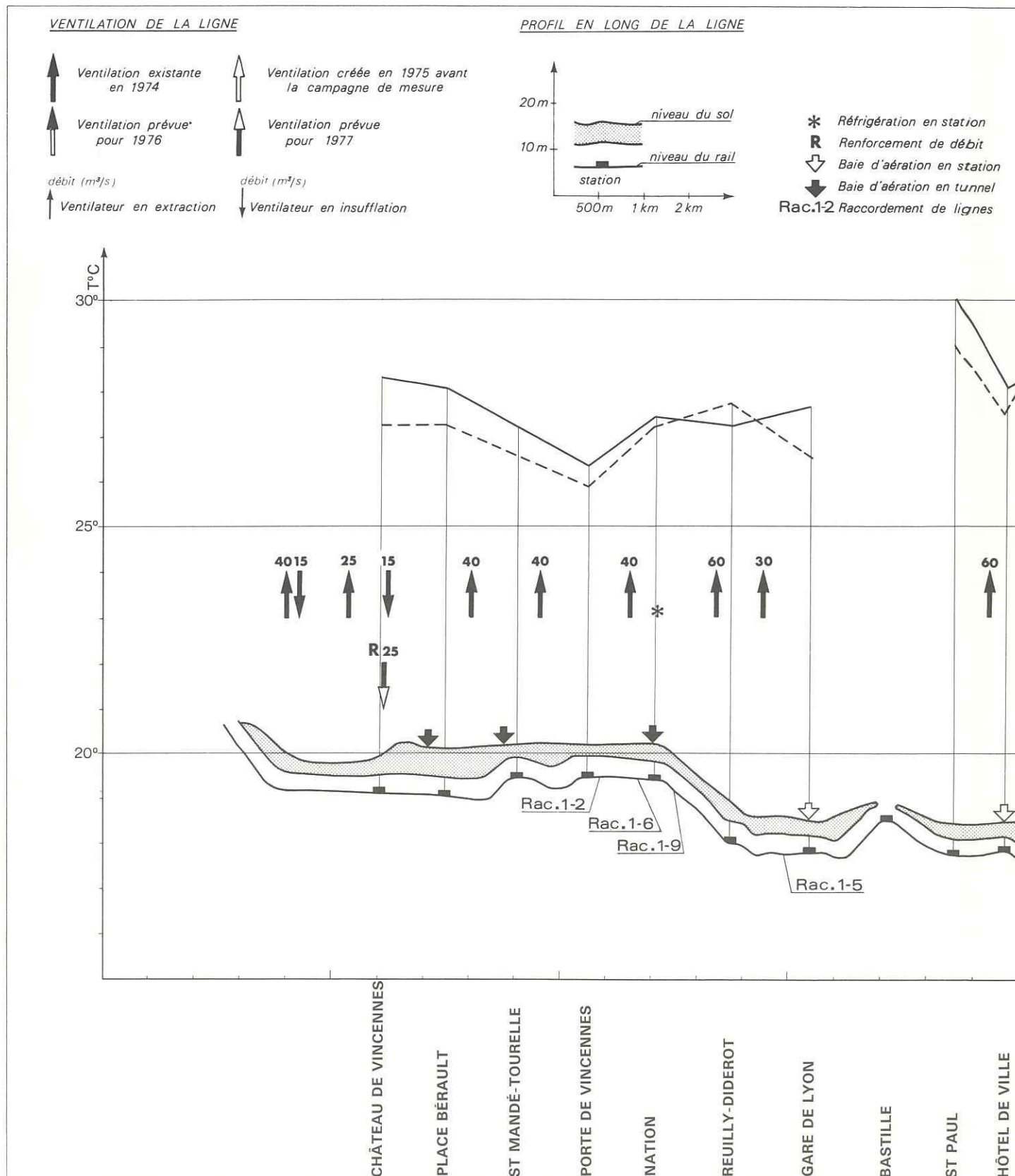


Fig.1 — Ventilation Nordling

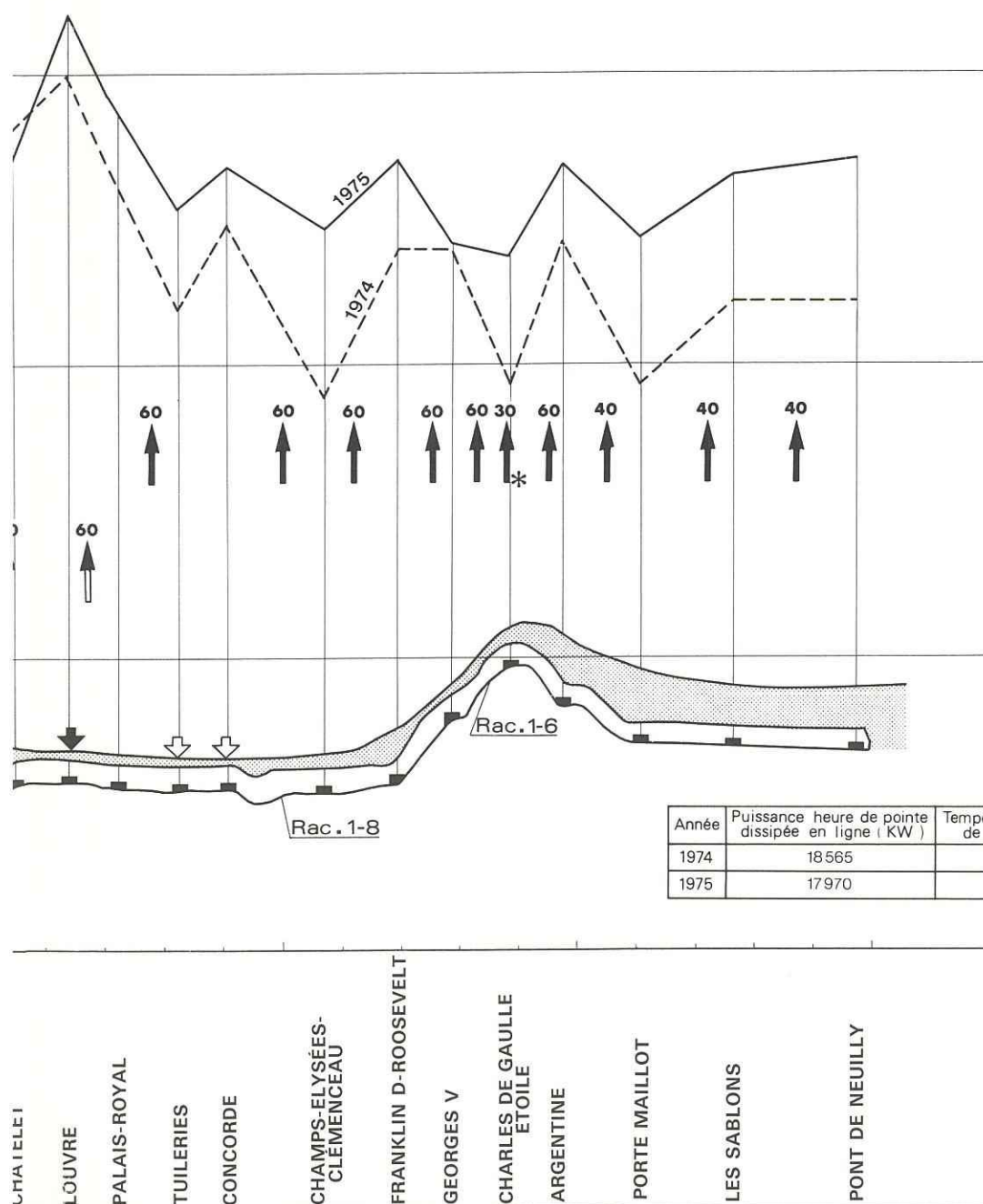
Annexe 3

Courbes de température des lignes

Température journalière corrigée en station, rapportée à une température extérieure moyenne de 22°C

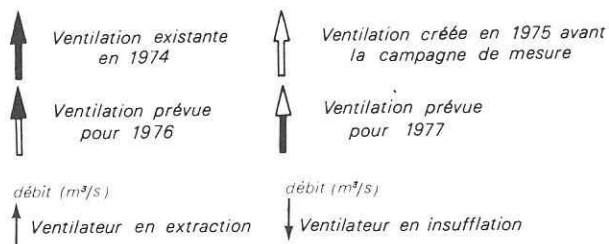


LIGNE 1

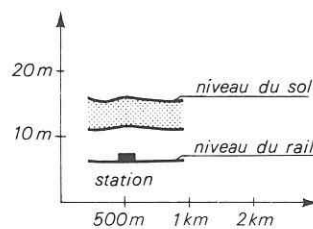


Année	Puissance heure de pointe dissipée en ligne (KW)	Température moyenne de la ligne (°C)	Débit nominal installé en m³/s
1974	18 565	26,9	920
1975	17 970	28,1	875

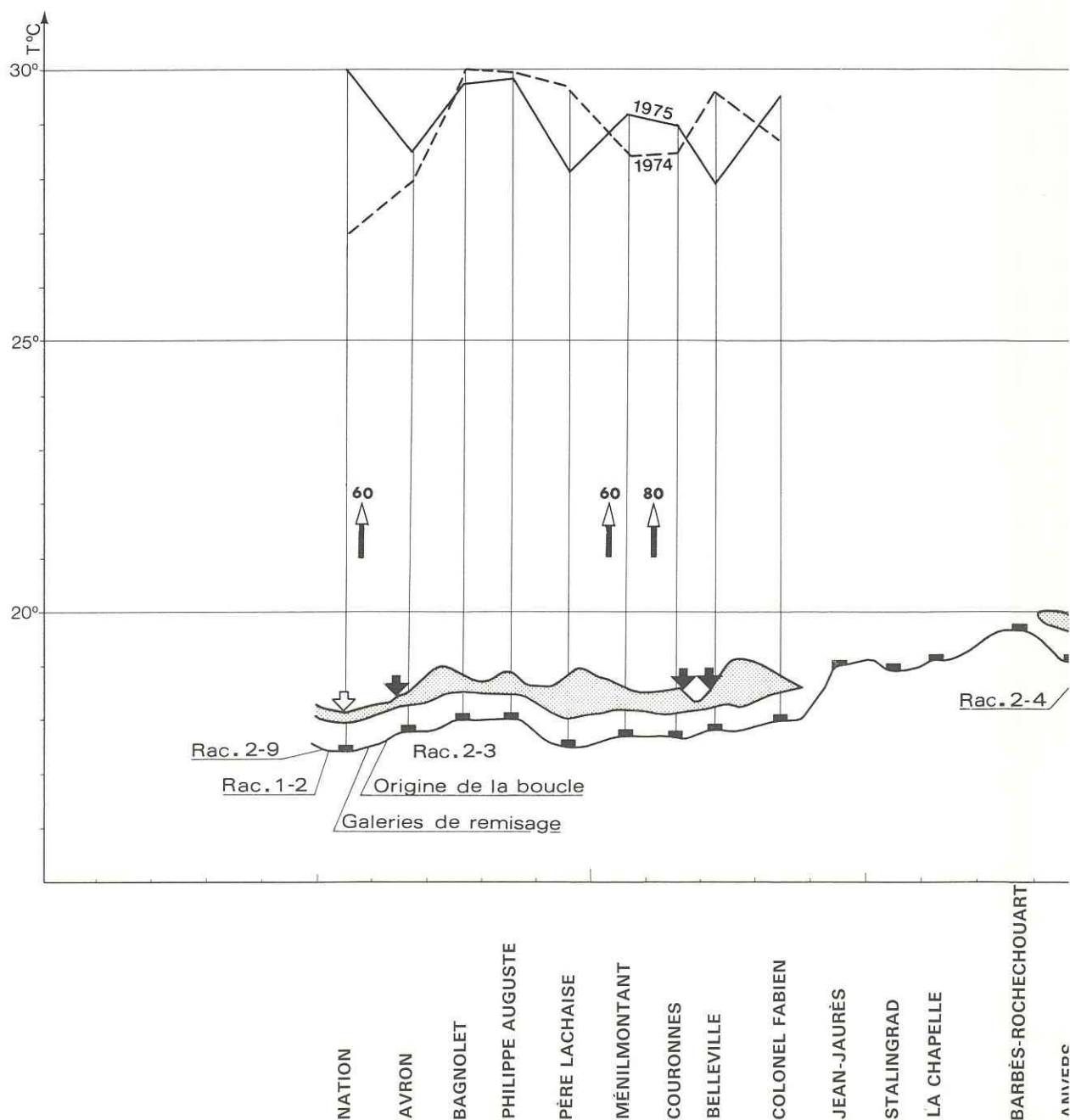
VENTILATION DE LA LIGNE



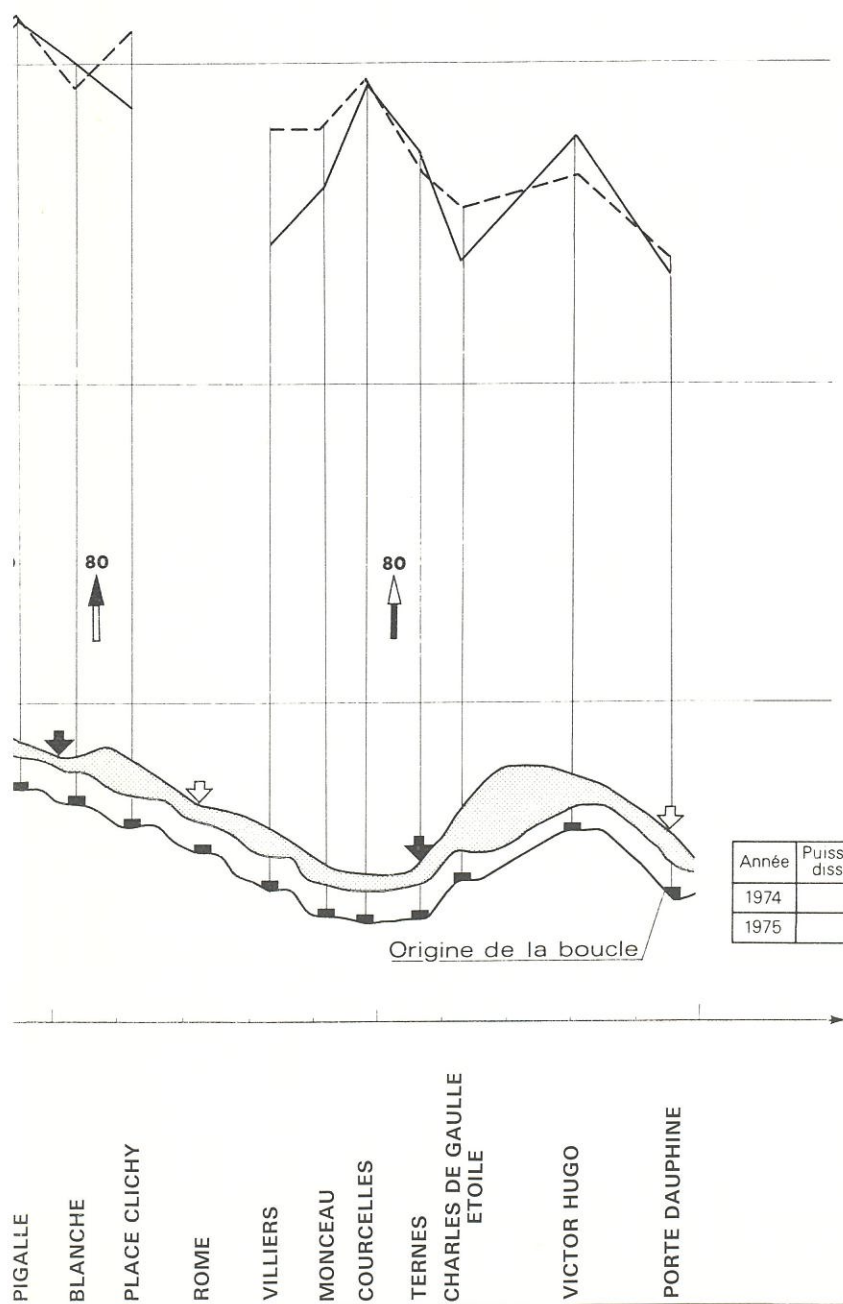
PROFIL EN LONG DE LA LIGNE



- * Réfrigération en station
- R Renforcement de débit
- ⇩ Baie d'aération en station
- ⇩ Baie d'aération en tunnel
- Rac.1-2 Raccordement de lignes

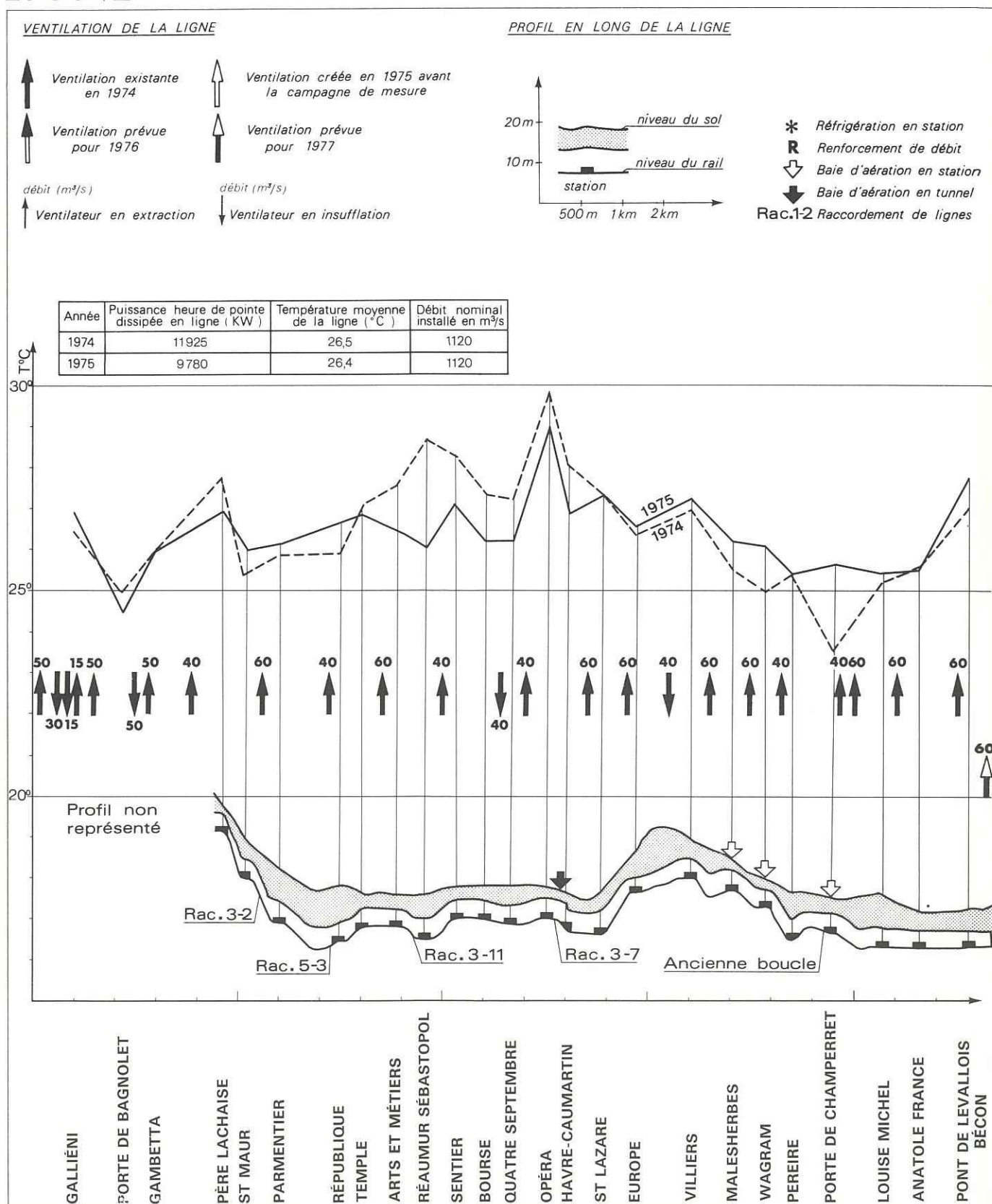


LIGNE 2

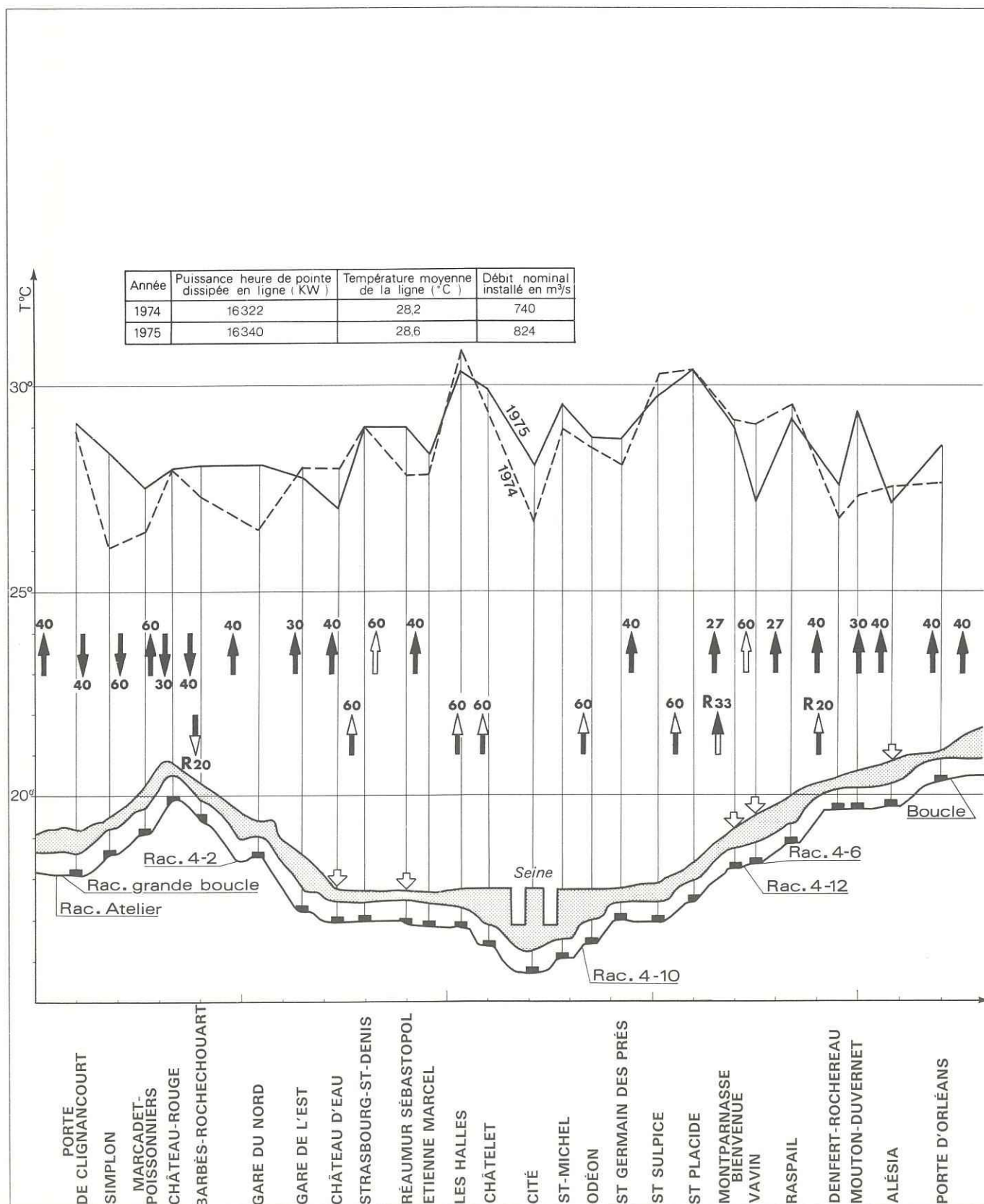


Année	Puissance heure de pointe dissipée en ligne (KW)	Température moyenne de la ligne (°C)	Débit nominal installé en m³/s
1974	9730	29	—
1975	10080	28,9	—

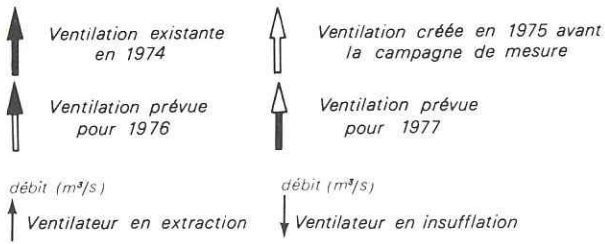
LIGNE 3



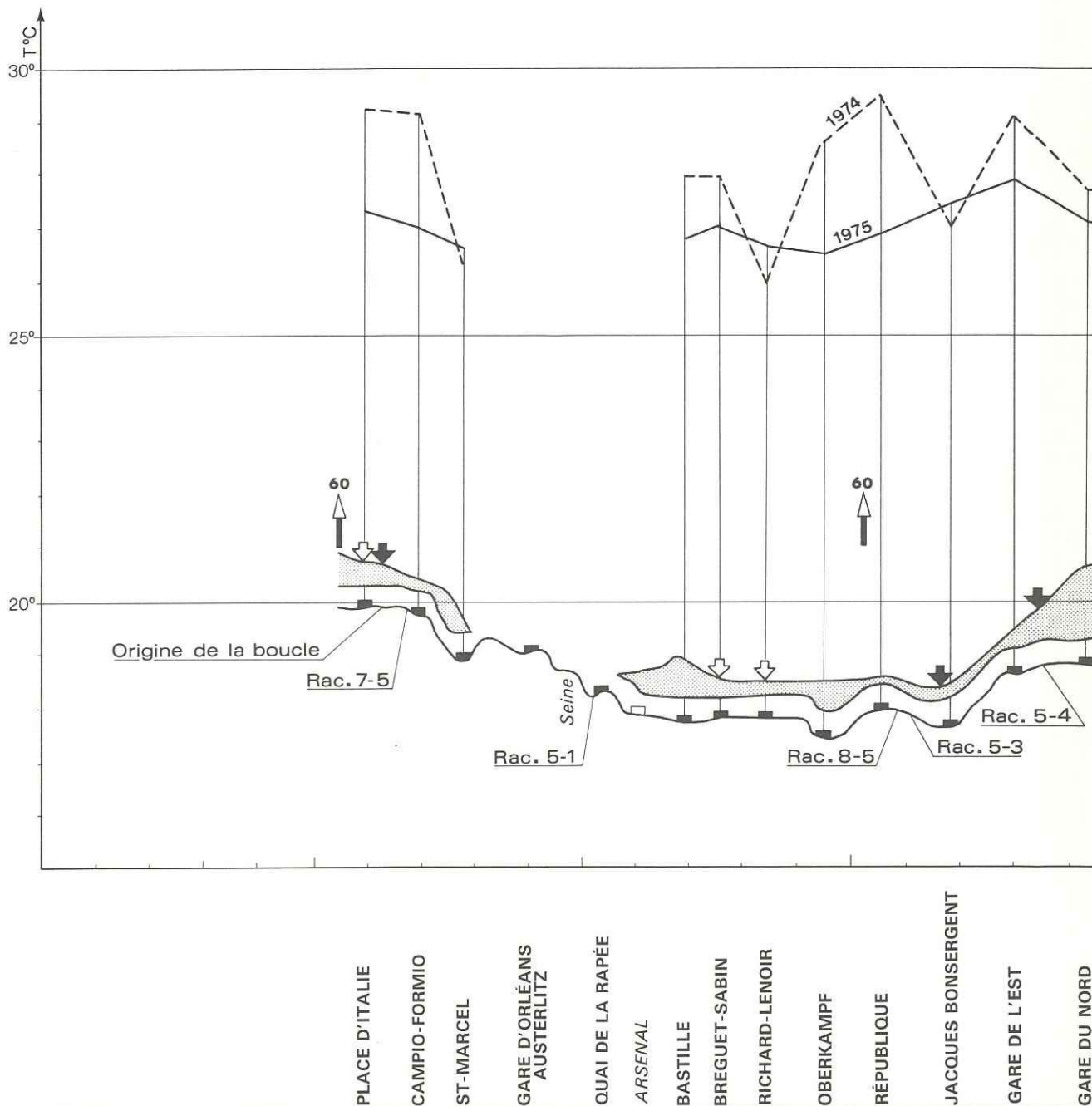
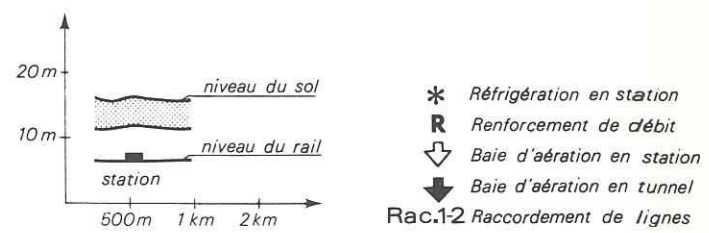
LIGNE 4



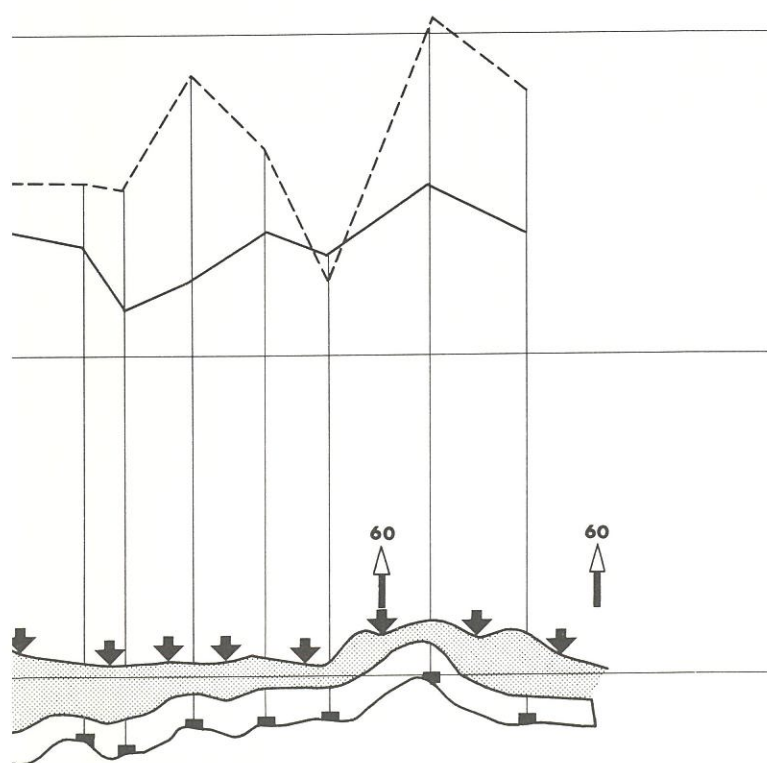
VENTILATION DE LA LIGNE



PROFIL EN LONG DE LA LIGNE



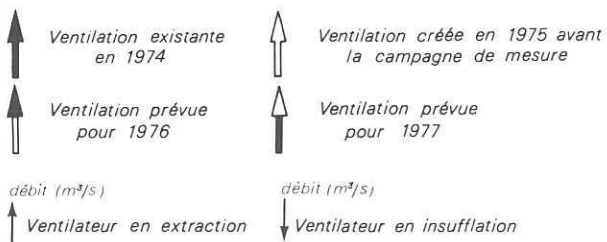
LIGNE 5



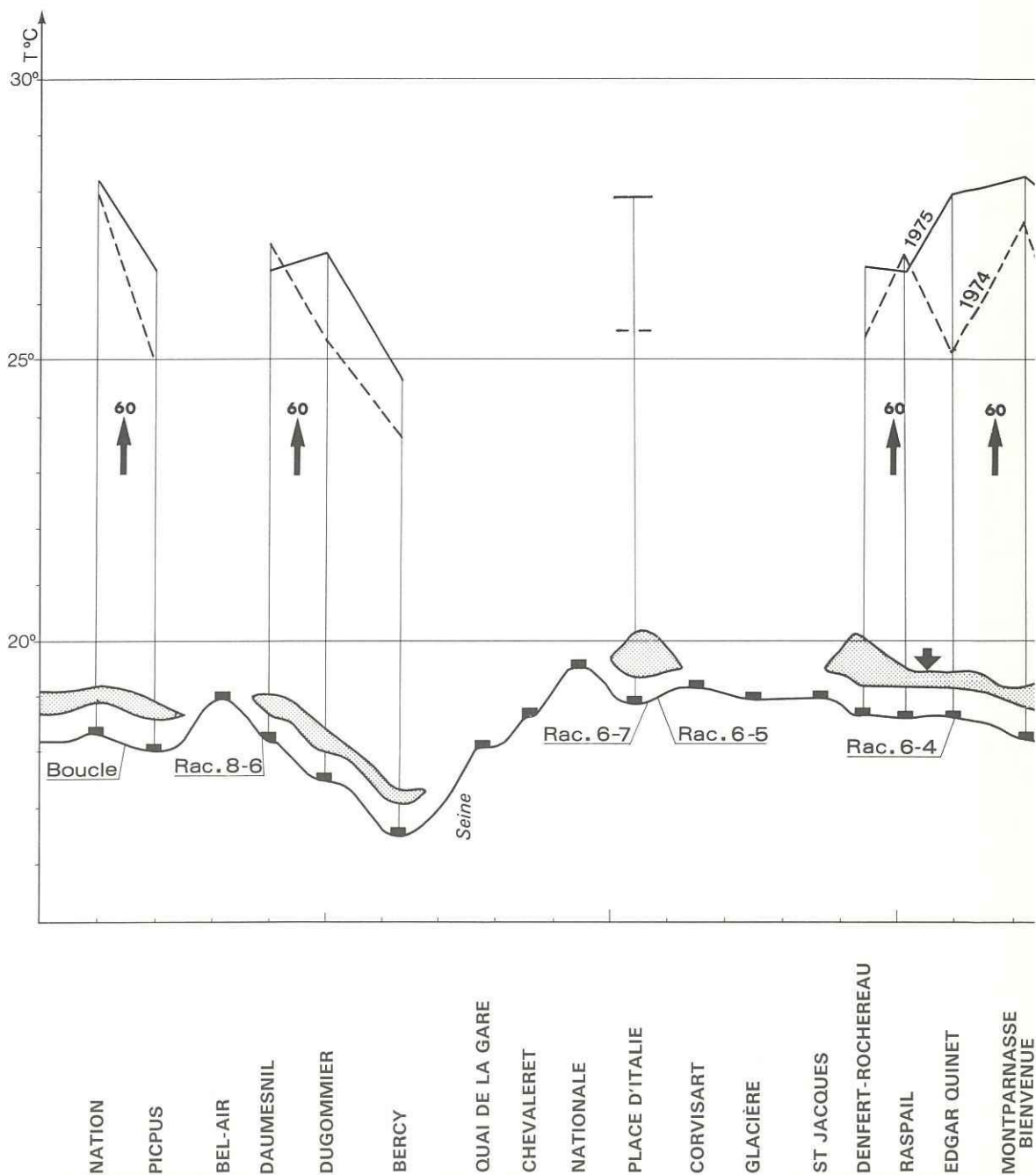
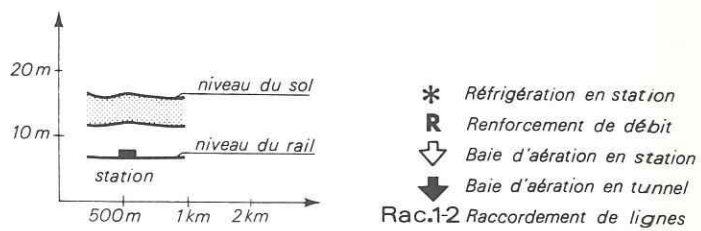
Année	Puissance heure de pointe dissipée en ligne (KW)	Température moyenne de la ligne (°C)	Débit nominal installé en m³/s
1974	7300	28,1	—
1975	6890	26,9	—

STALINGRAD
JEAN-JAURÈS
LAUMIÈRE
OURCQ
PORTE DE PANTIN
HOCHÉ
EGLISE DE PANTIN

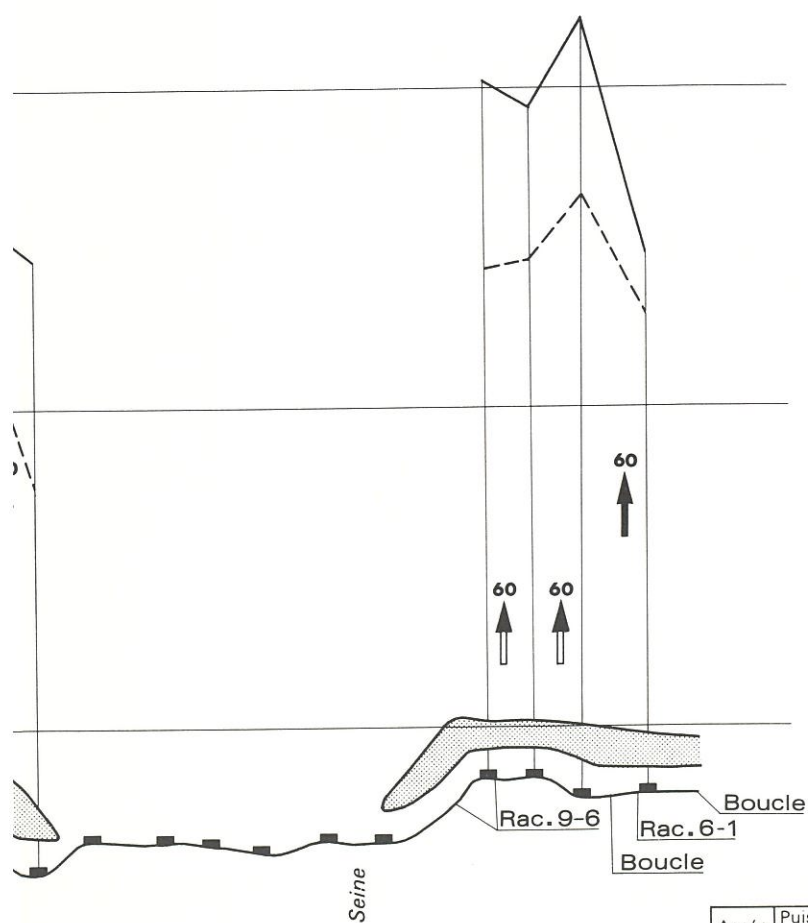
VENTILATION DE LA LIGNE



PROFIL EN LONG DE LA LIGNE



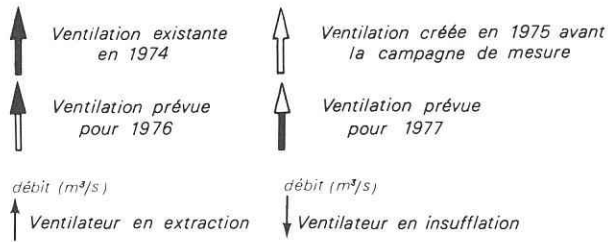
LIGNE 6



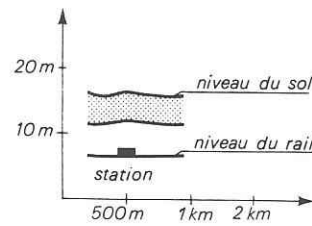
Année	Puissance heure de pointe dissipée en ligne (KW)	Température moyenne de la ligne (°C)	Débit nominal installé en m³/s
1974	9039	26	300
1975	15695	27,8	360

PASTEUR
SÈVRES-LECOURBE
CAMBRONNE
LA MOTTE-PICQUET-
GRENELLE
DUPLEIX
BIR-HAKEIM
PASSY
TROCADÉRO
BOISSIÈRE
KLÉBER
CHARLES DE GAULLE
ETOILE

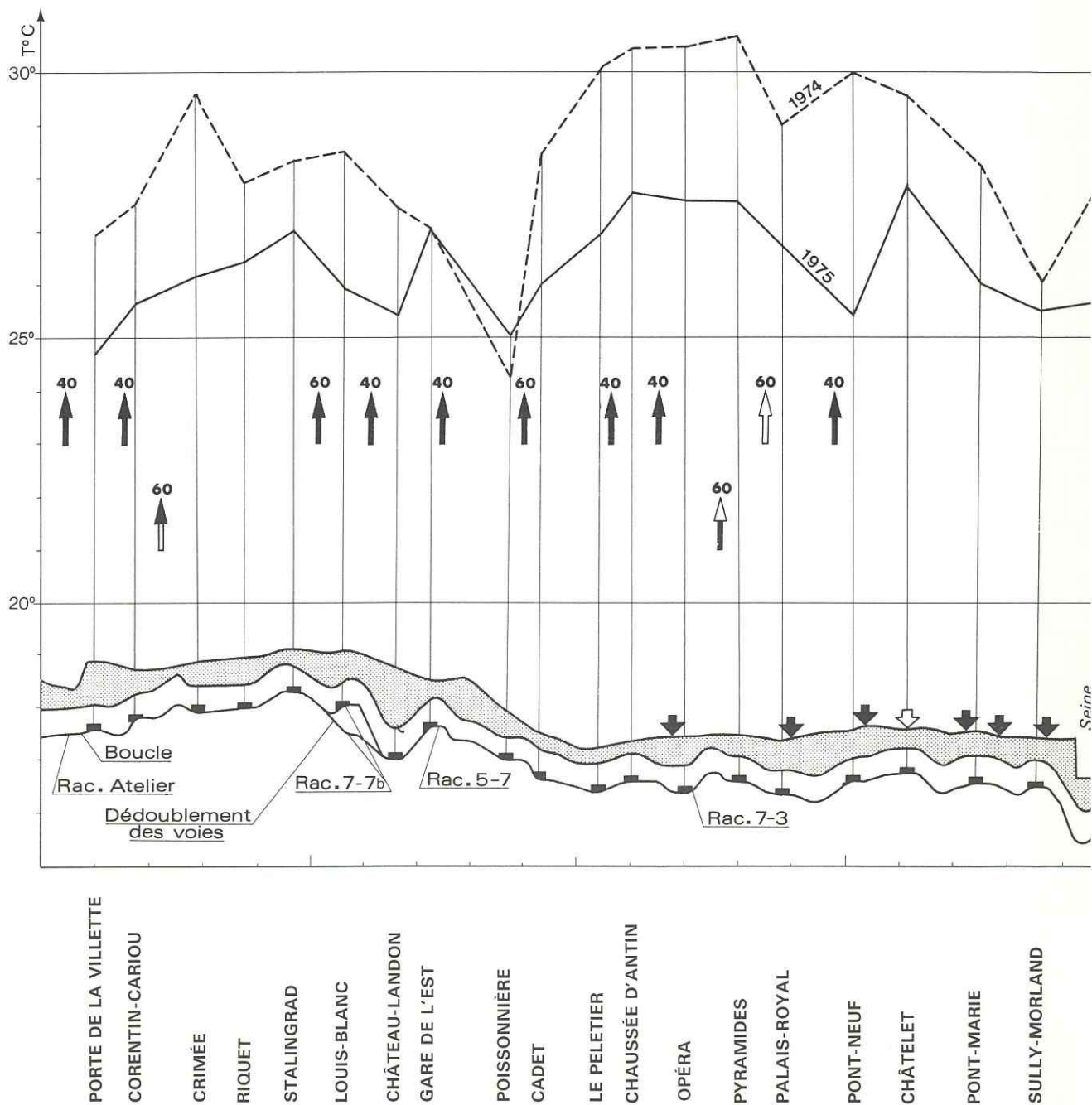
VENTILATION DE LA LIGNE



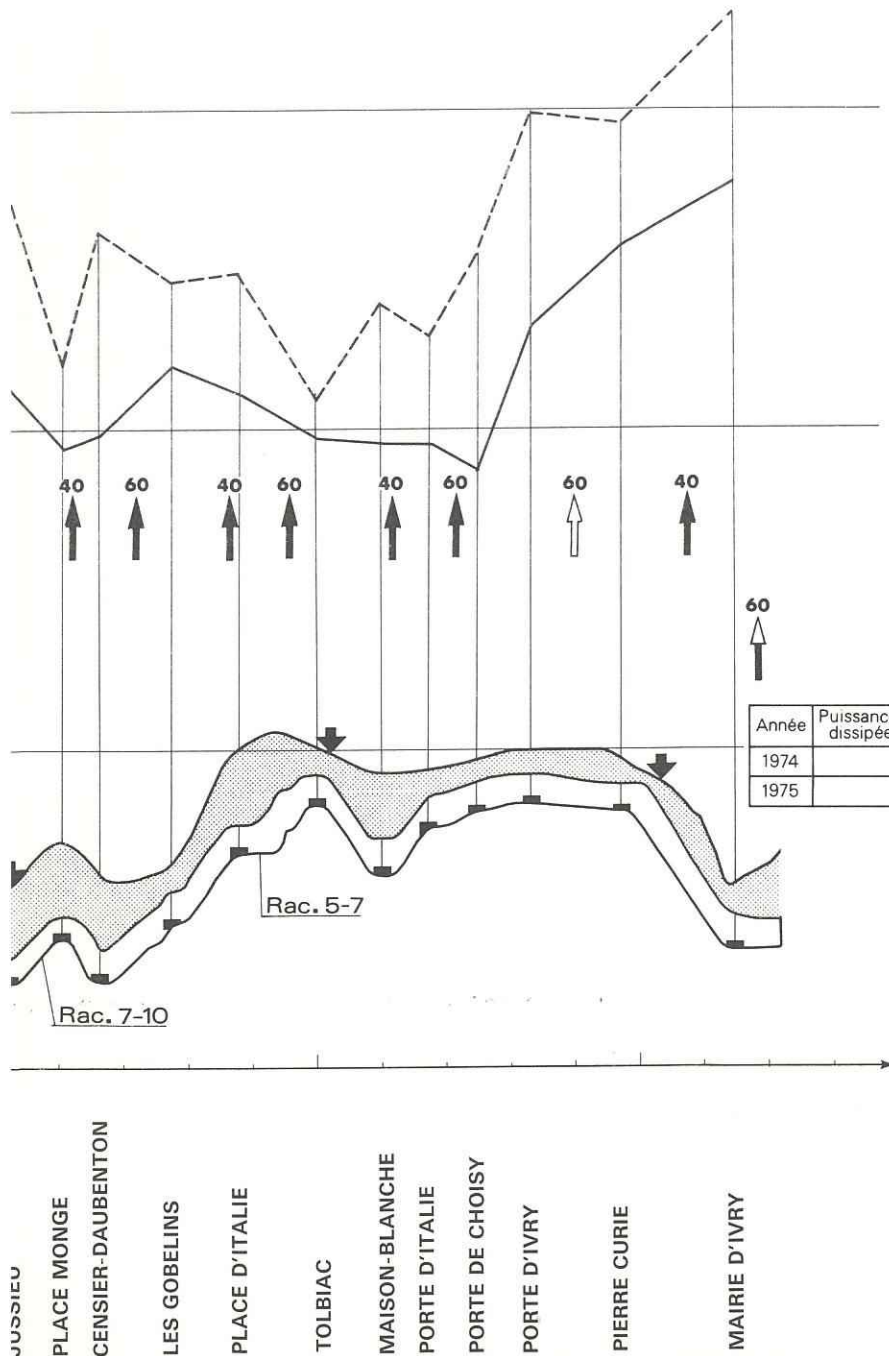
PROFIL EN LONG DE LA LIGNE



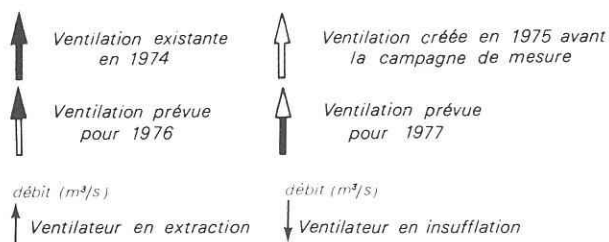
- * Réfrigération en station
- R Renforcement de débit
- ⇩ Baie d'aération en station
- ⇩ Baie d'aération en tunnel
- Rac.1-2 Raccordement de lignes



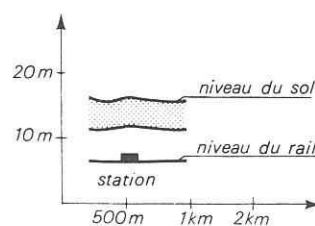
LIGNE 7



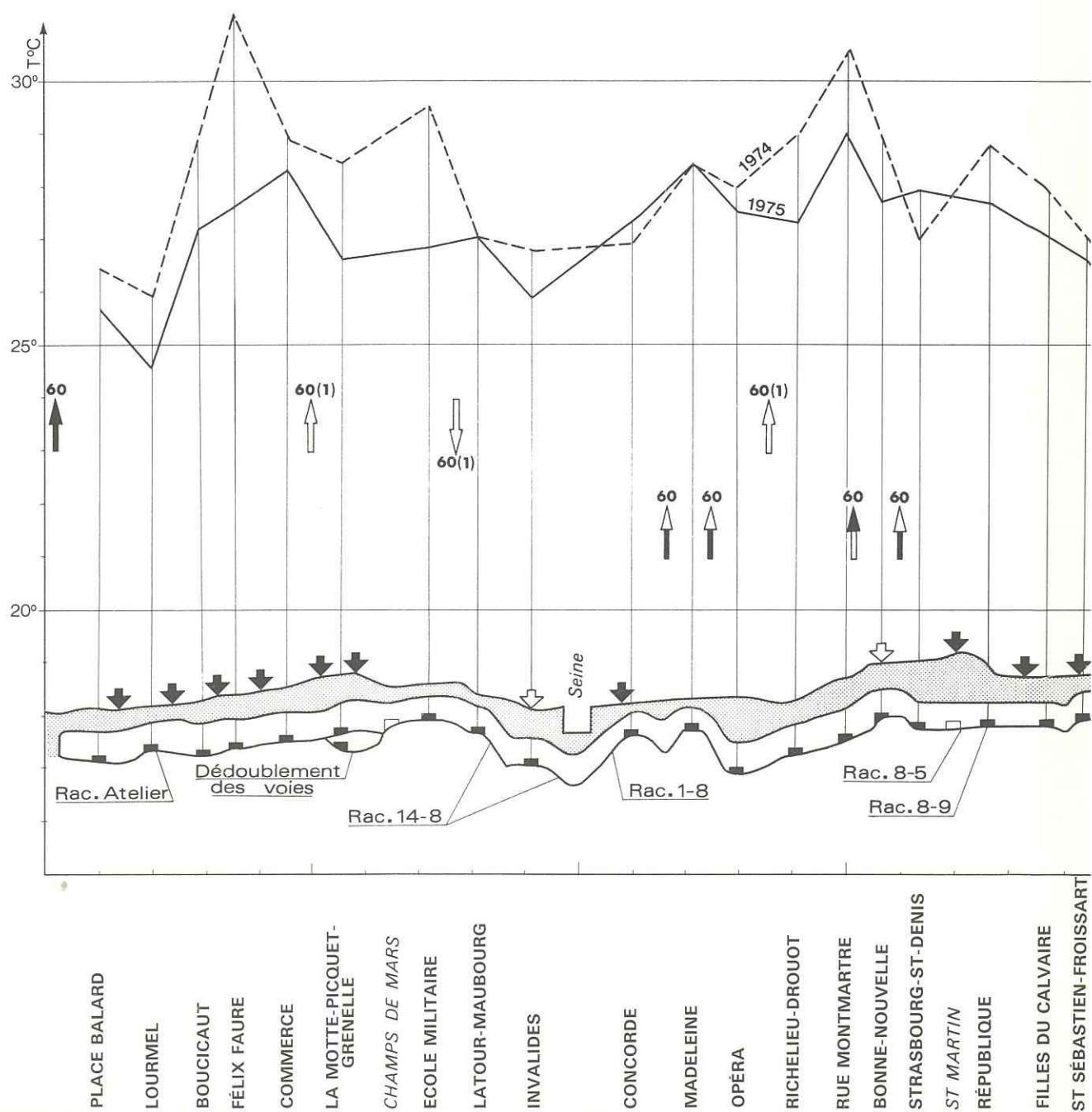
VENTILATION DE LA LIGNE



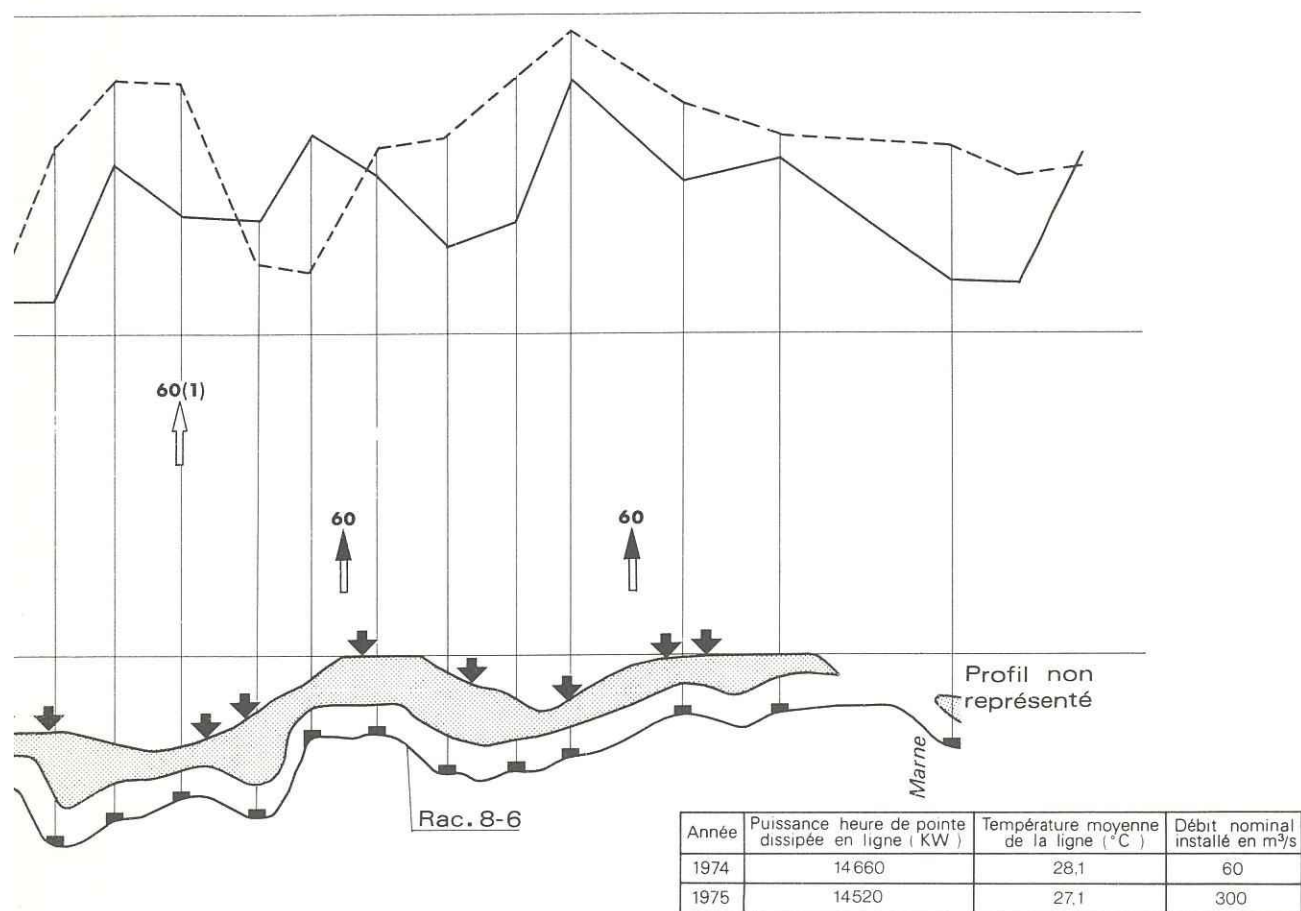
PROFIL EN LONG DE LA LIGNE



- * Réfrigération en station
- R Renforcement de débit
- ⇩ Baie d'aération en station
- ⇩ Baie d'aération en tunnel
- Rac.1-2 Raccordement de lignes



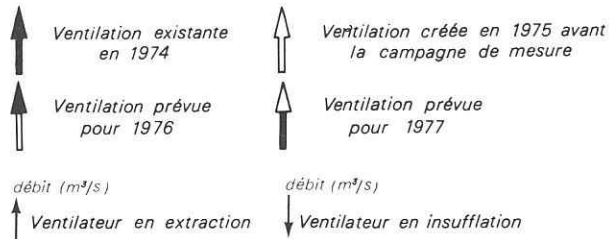
LIGNE 8



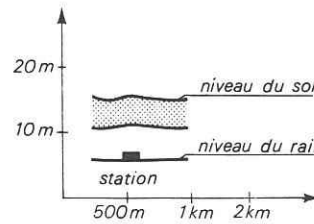
(1) mis en service pendant la campagne de mesure

BASTILLE
LEDUJ-ROLLIN
FAIDHERBE-CHALIGNY
REUILLY-DIDEROT
MONTGALLET
DAUMESNIL
MICHEL-BIZOT
PORTE DORÉE
PORTE DE CHARENTON
LIBERTÉ
CHARENTON-ECOLE
ECOLE VÉTÉRAIRE
MAISONS-ALFORT-STADE
MAISONS-ALFORT
LES JUILLIOTTES

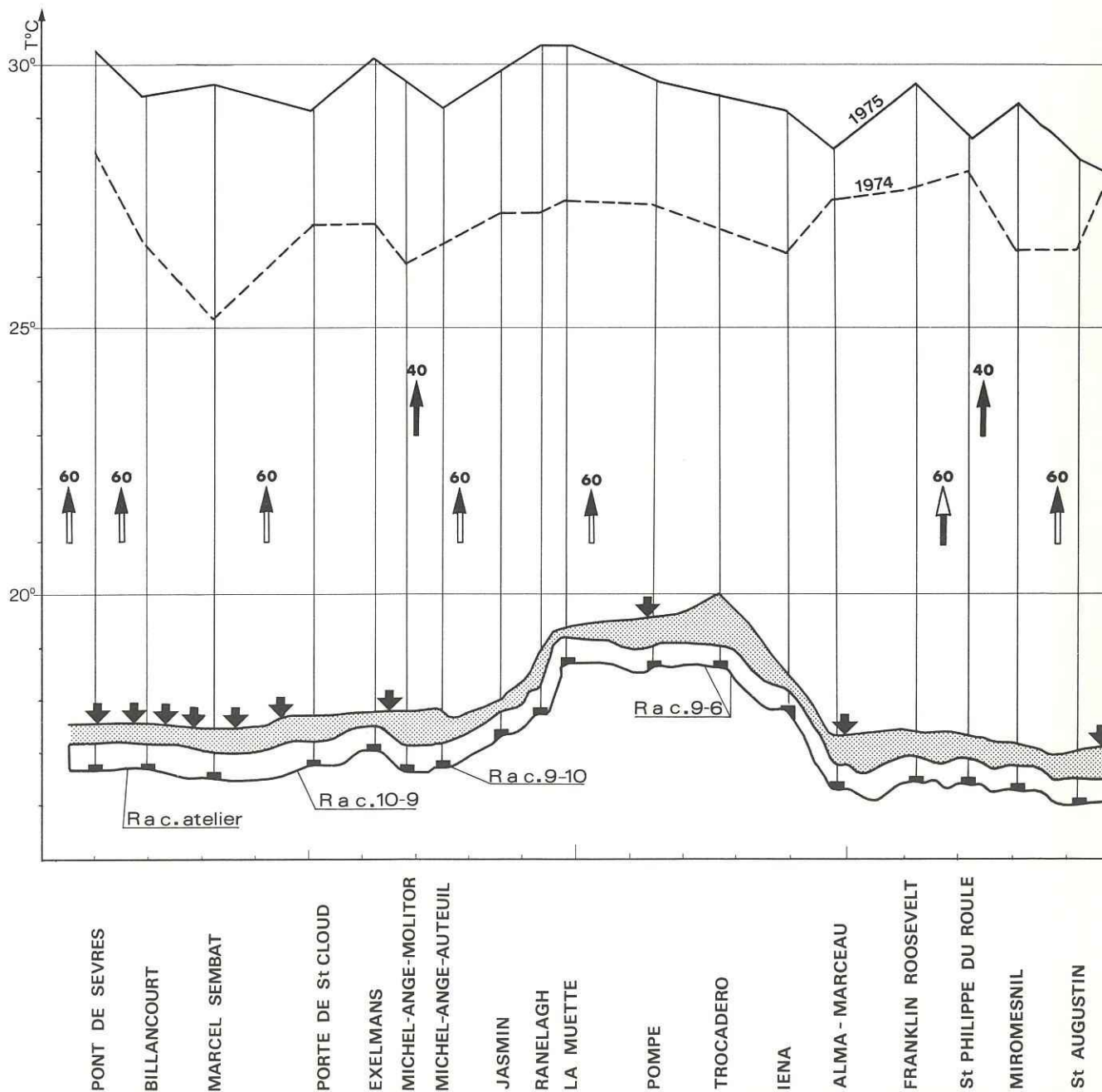
VENTILATION DE LA LIGNE



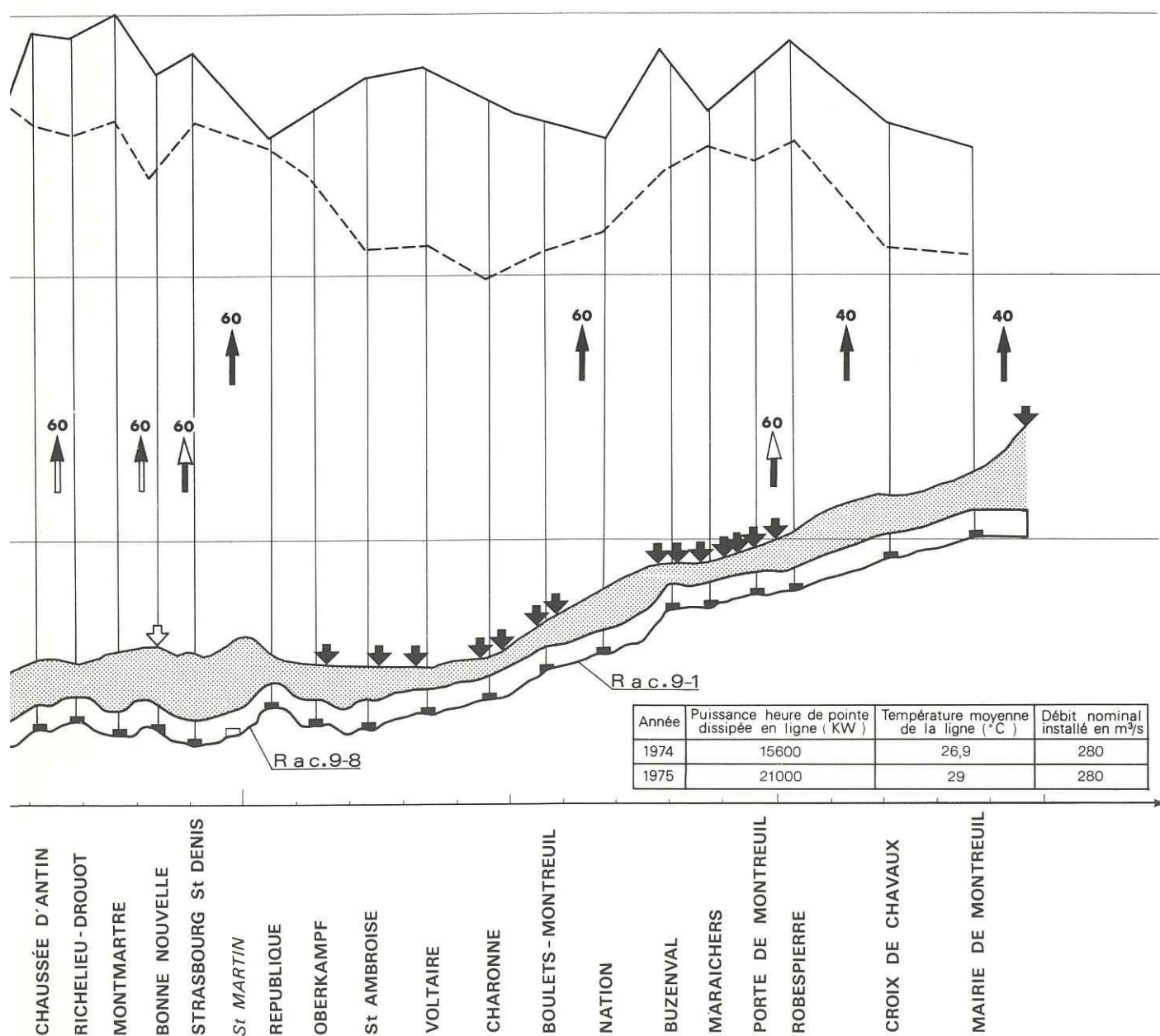
PROFIL EN LONG DE LA LIGNE



- * Réfrigération en station
- R Renforcement de débit
- ↓ Baie d'aération en station
- ↓ Baie d'aération en tunnel
- Rac.1-2 Raccordement de lignes

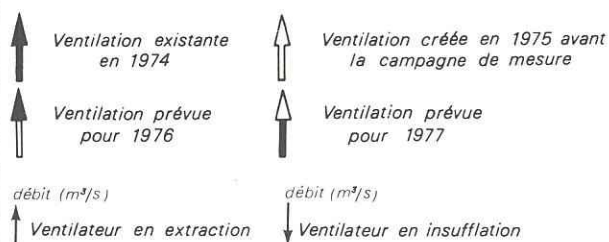


LIGNE 9

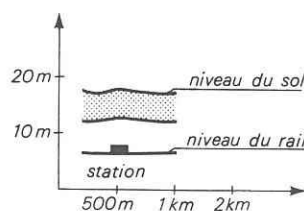


LIGNE 10

VENTILATION DE LA LIGNE

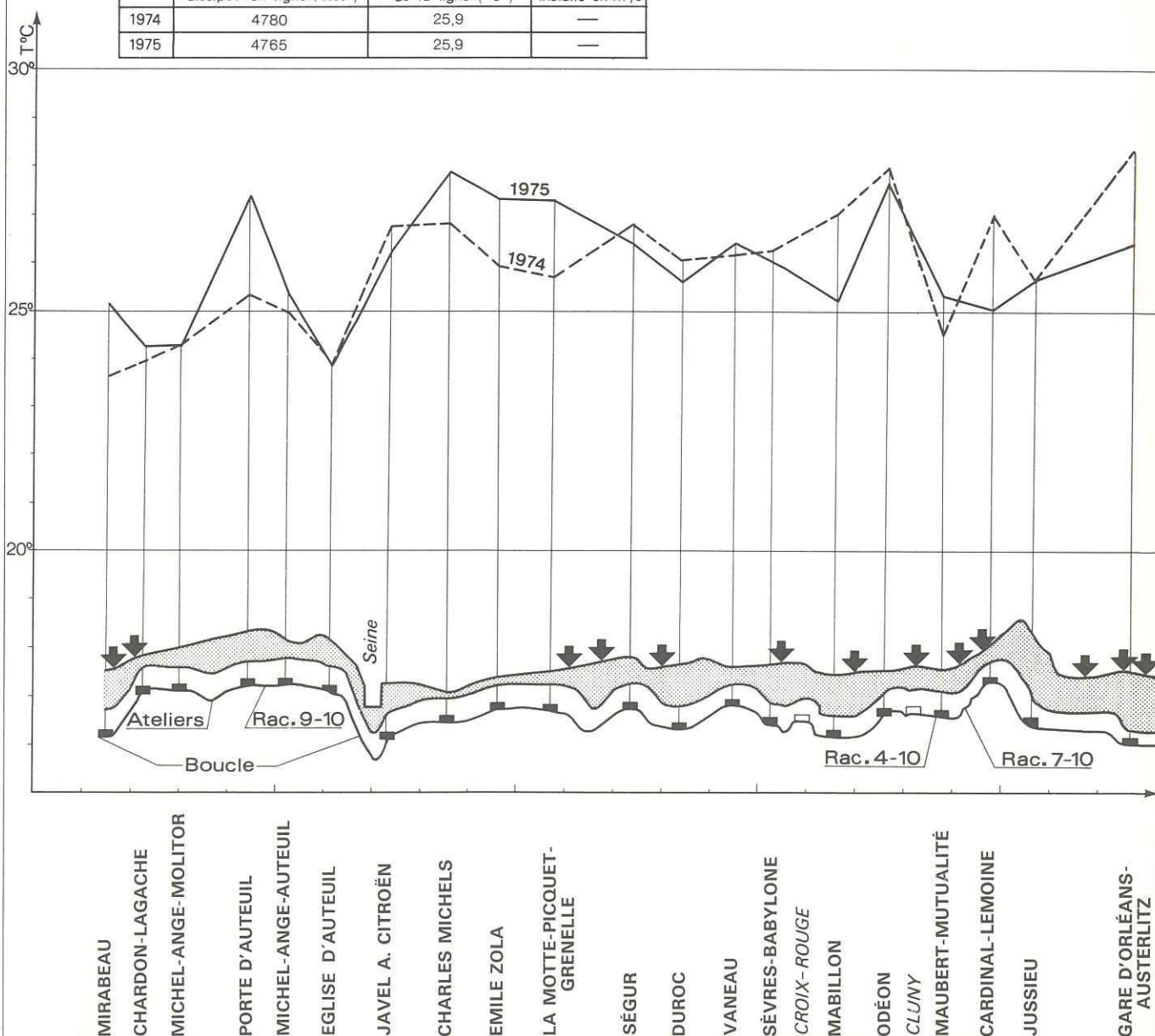


PROFIL EN LONG DE LA LIGNE

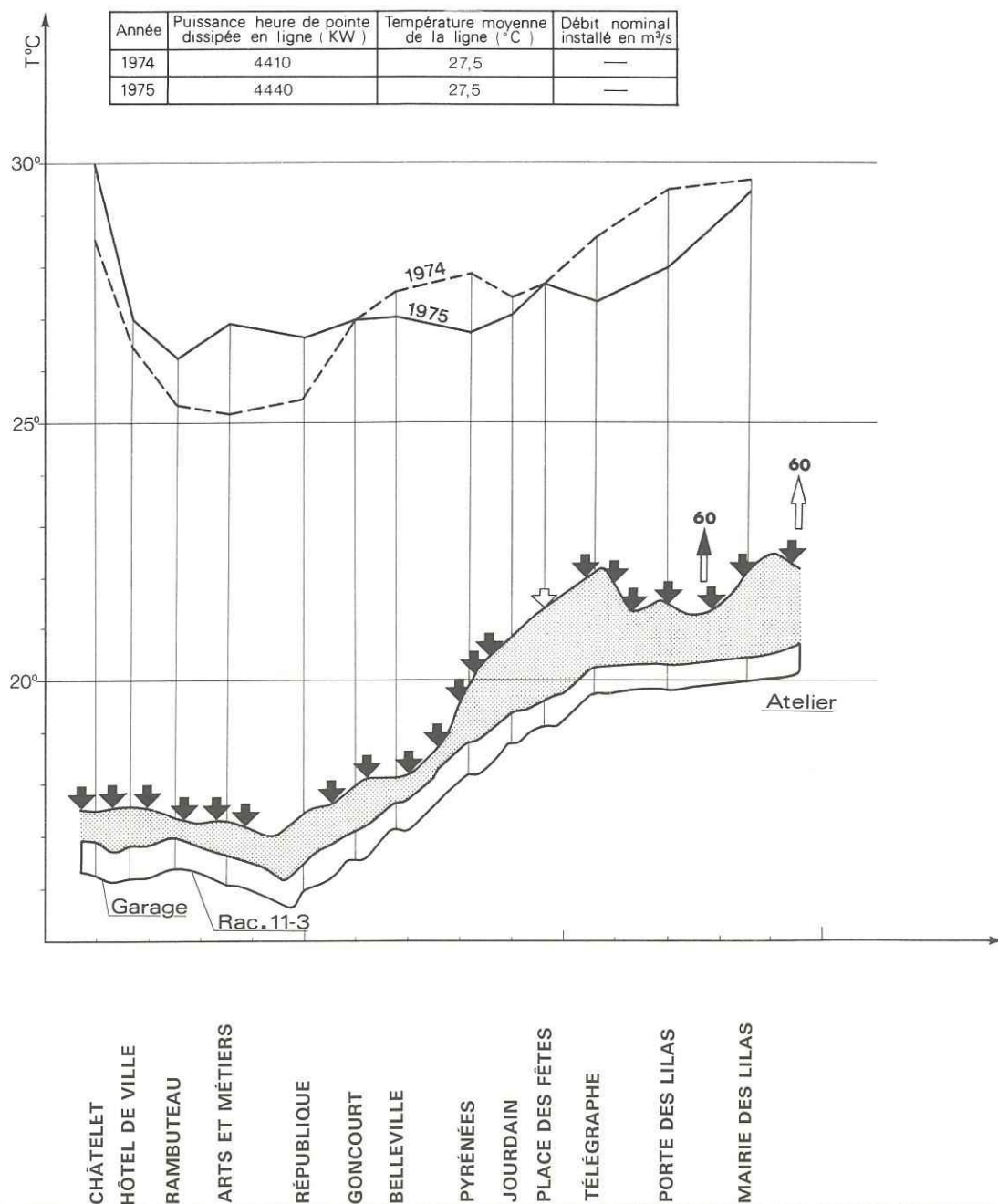


- * Réfrigération en station
- R Renforcement de débit
- ↓ Baie d'aération en station
- ↓ Baie d'aération en tunnel
- Rac.12 Raccordement de lignes

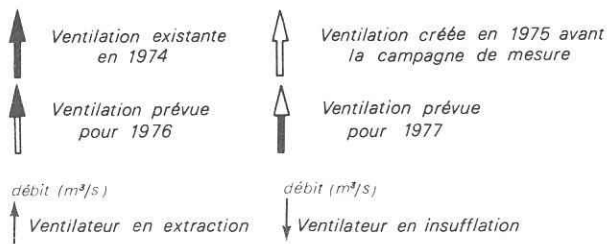
Année	Puissance heure de pointe dissipée en ligne (KW)	Température moyenne de la ligne (°C)	Débit nominal installé en m³/s
1974	4780	25,9	—
1975	4765	25,9	—



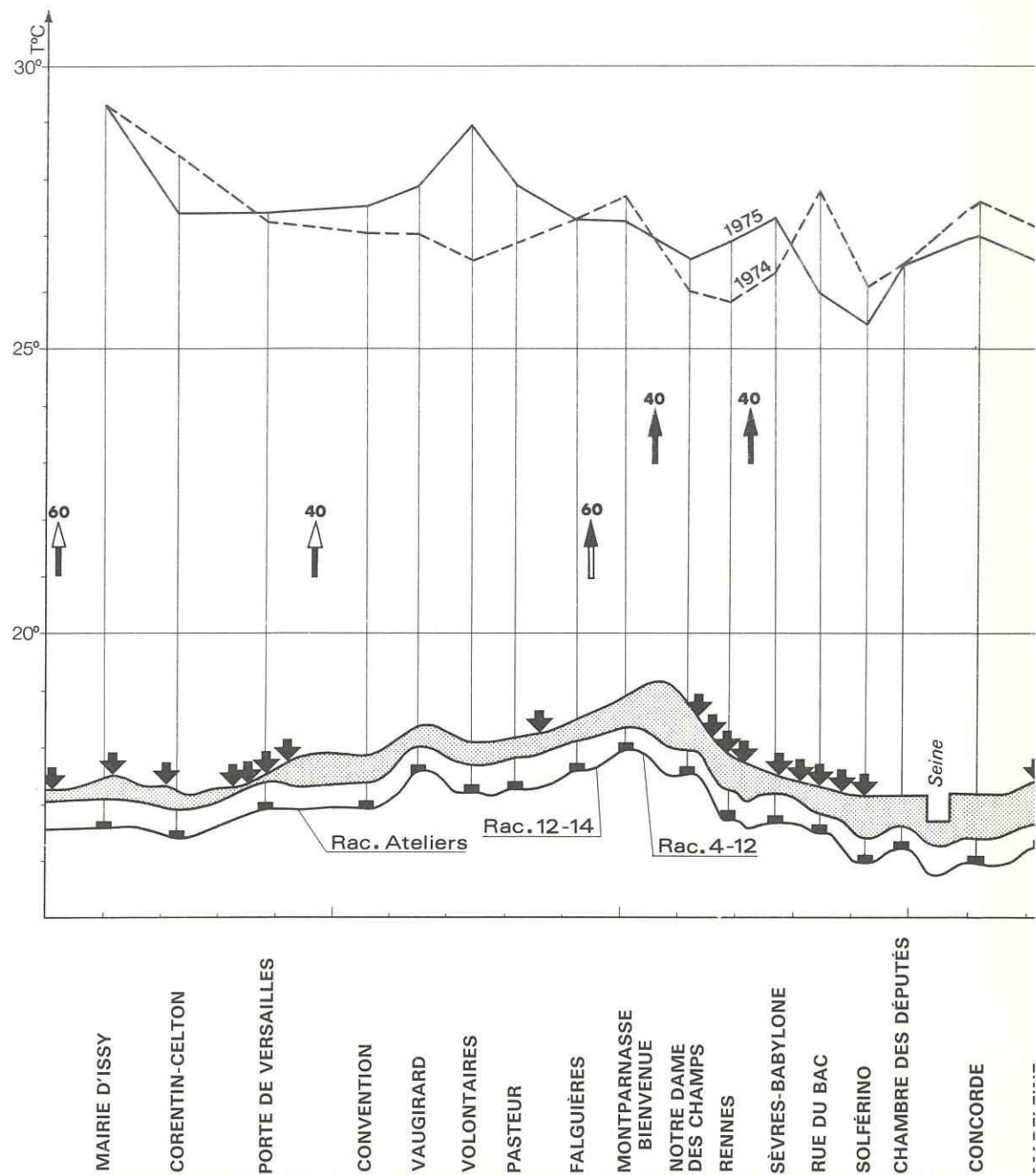
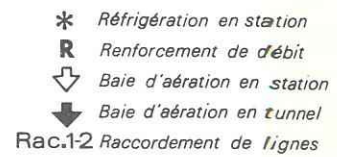
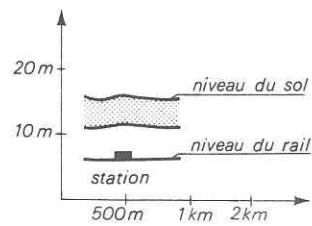
LIGNE 11



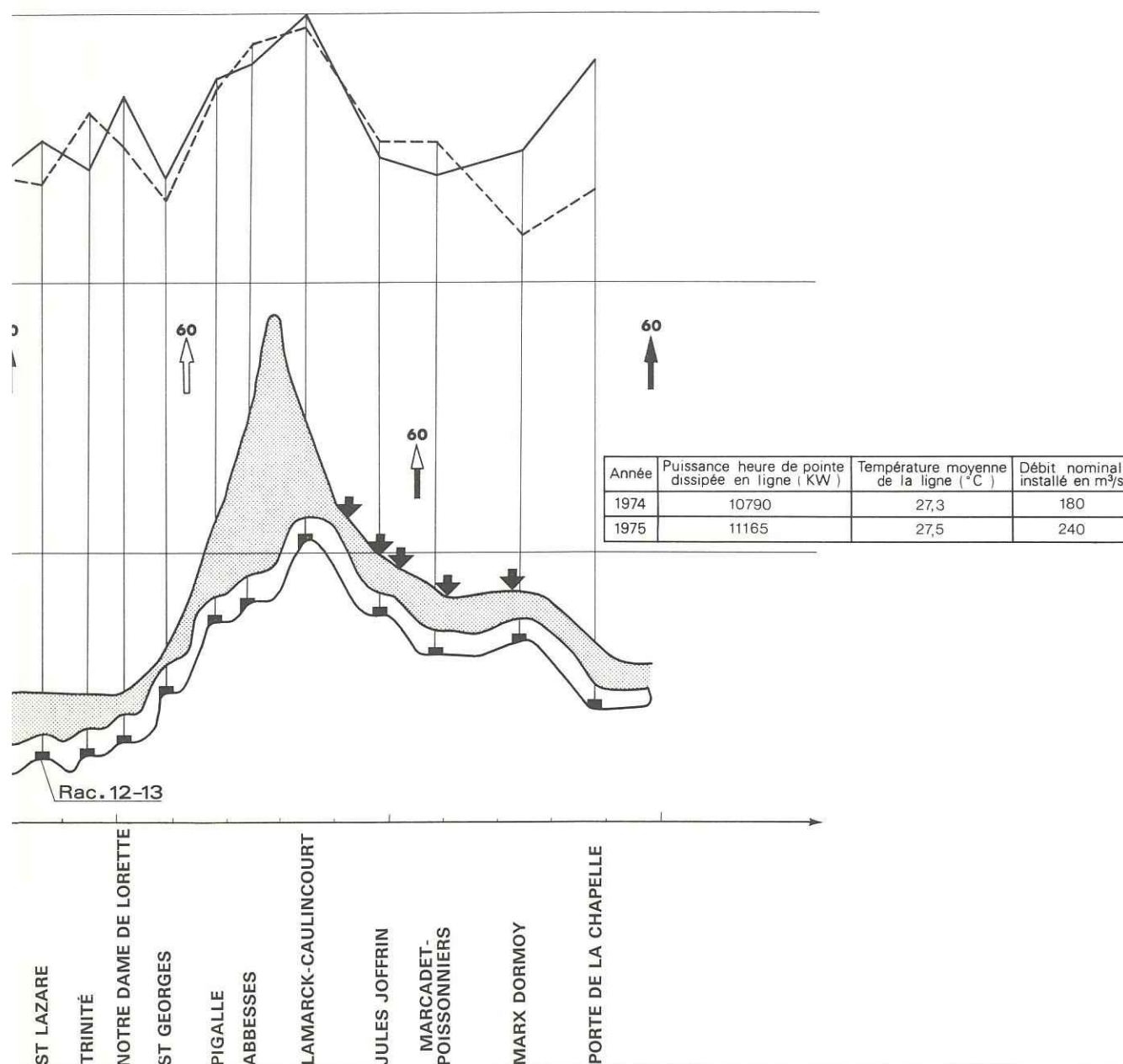
VENTILATION DE LA LIGNE



PROFIL EN LONG DE LA LIGNE

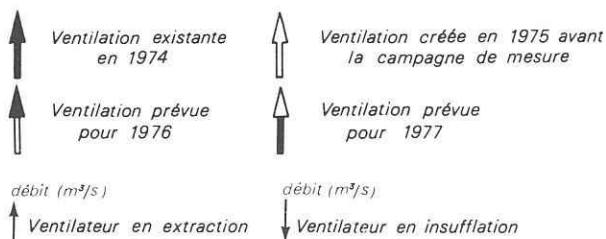


LIGNE 12

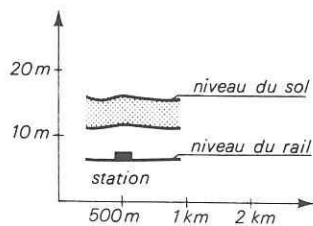


LIGNE 13

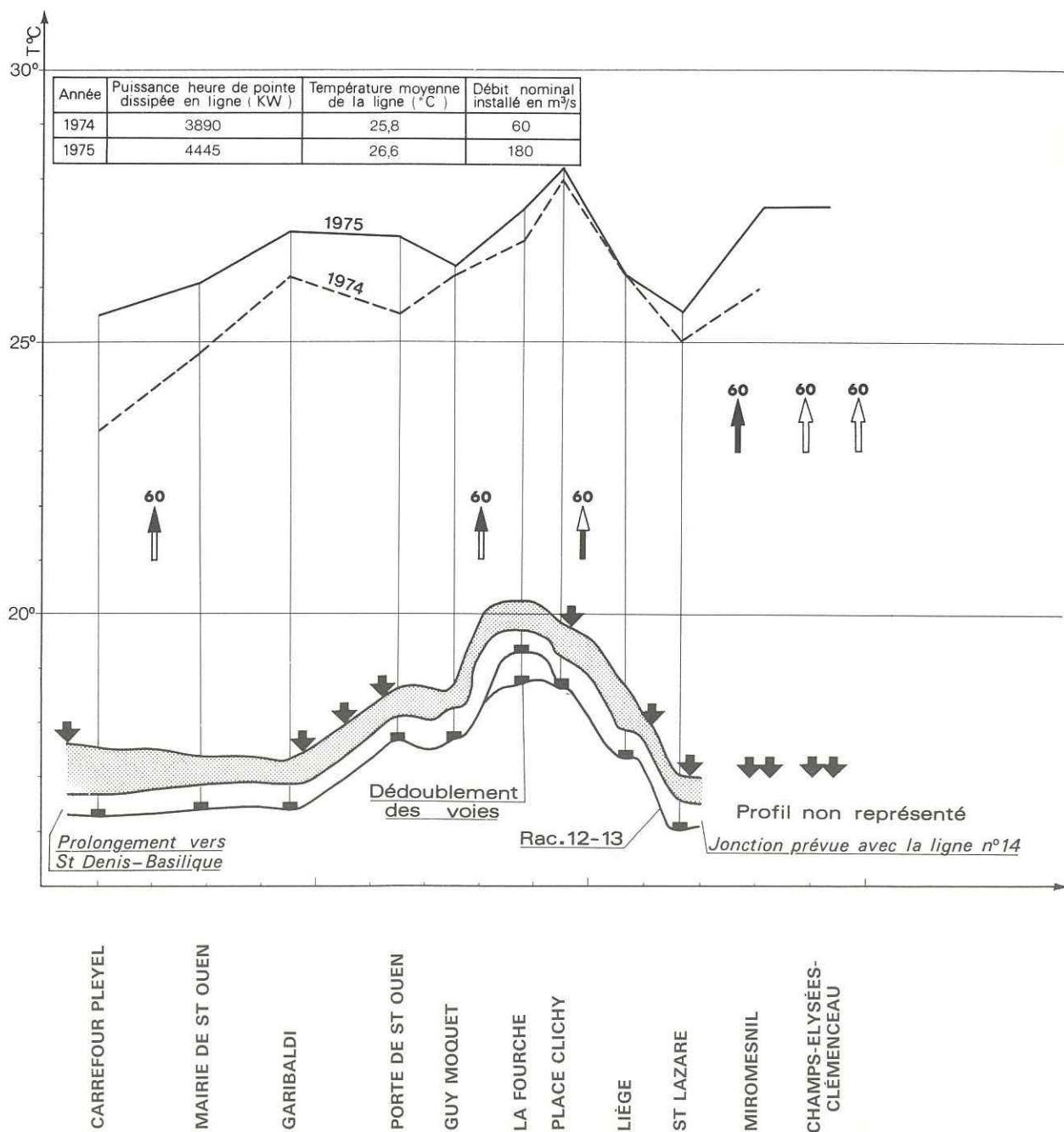
VENTILATION DE LA LIGNE



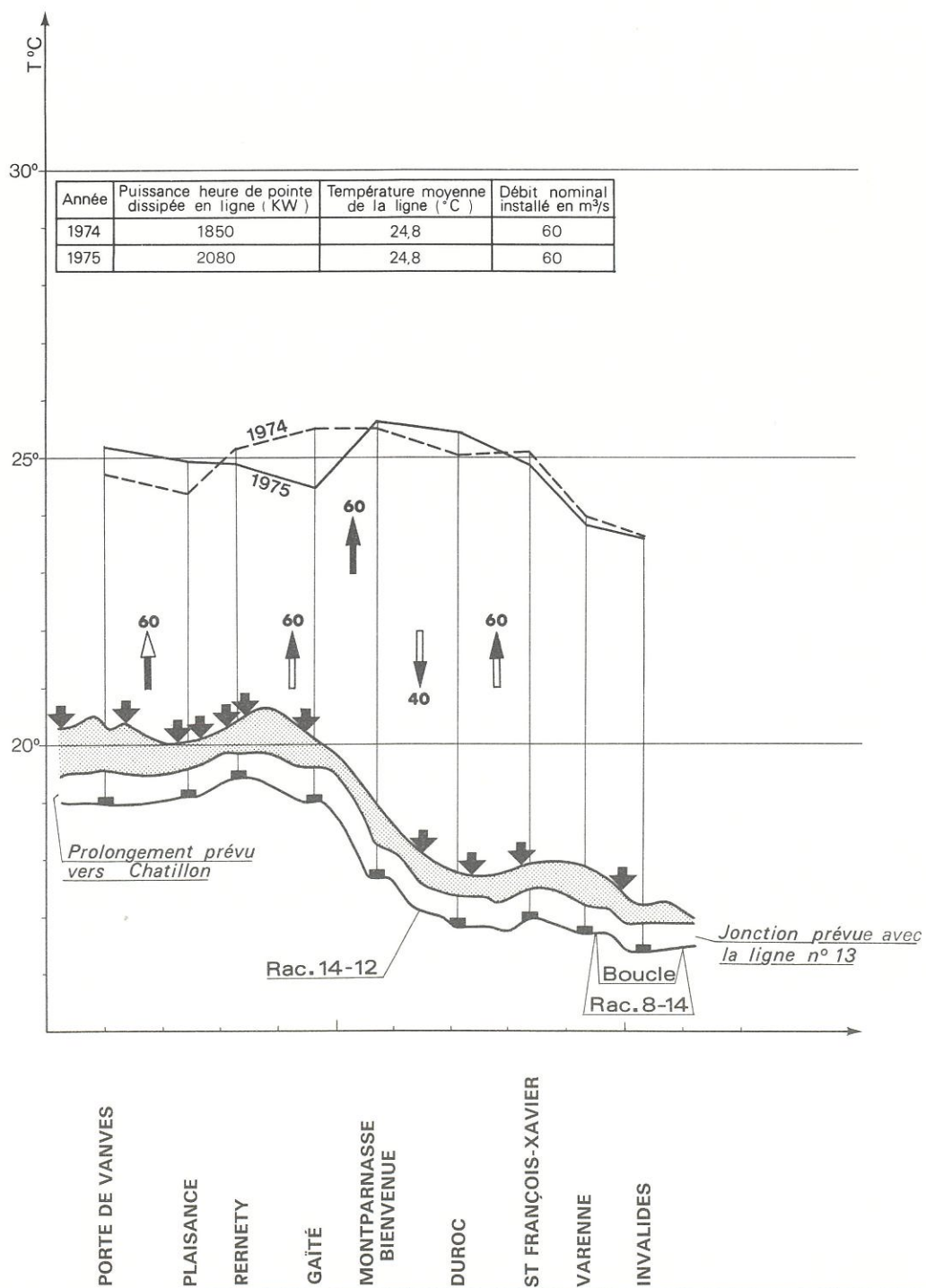
PROFIL EN LONG DE LA LIGNE



- * Réfrigération en station
R Renforcement de débit
⇩ Baie d'aération en station
⇩ Baie d'aération en tunnel
Rac.12 Raccordement de lignes



LIGNE 14





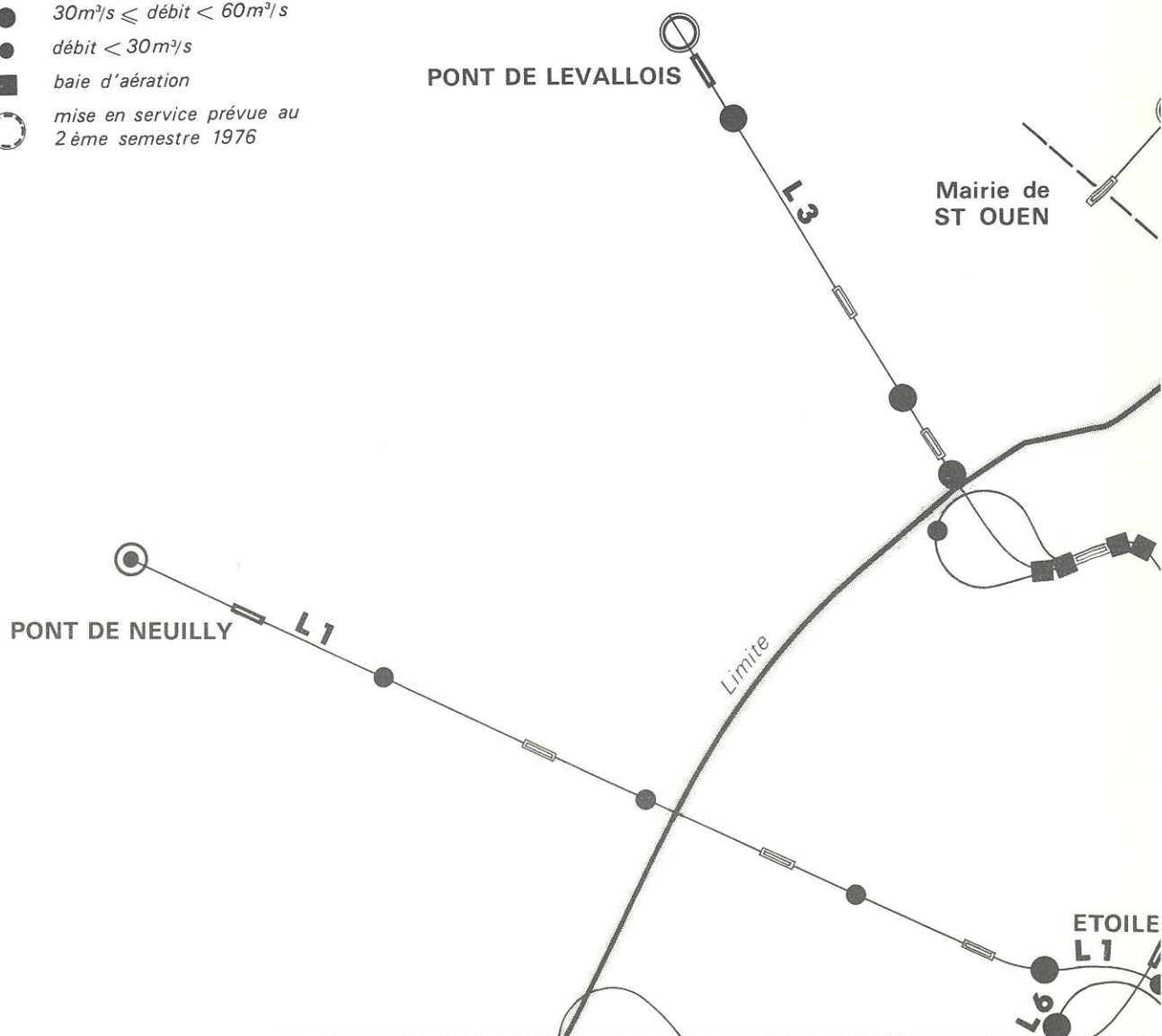
Gaine de ventilation d'Auber

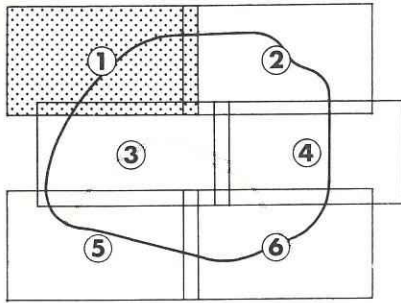
Annexe 4

Plan d'implantation des ventilateurs et baies d'aération

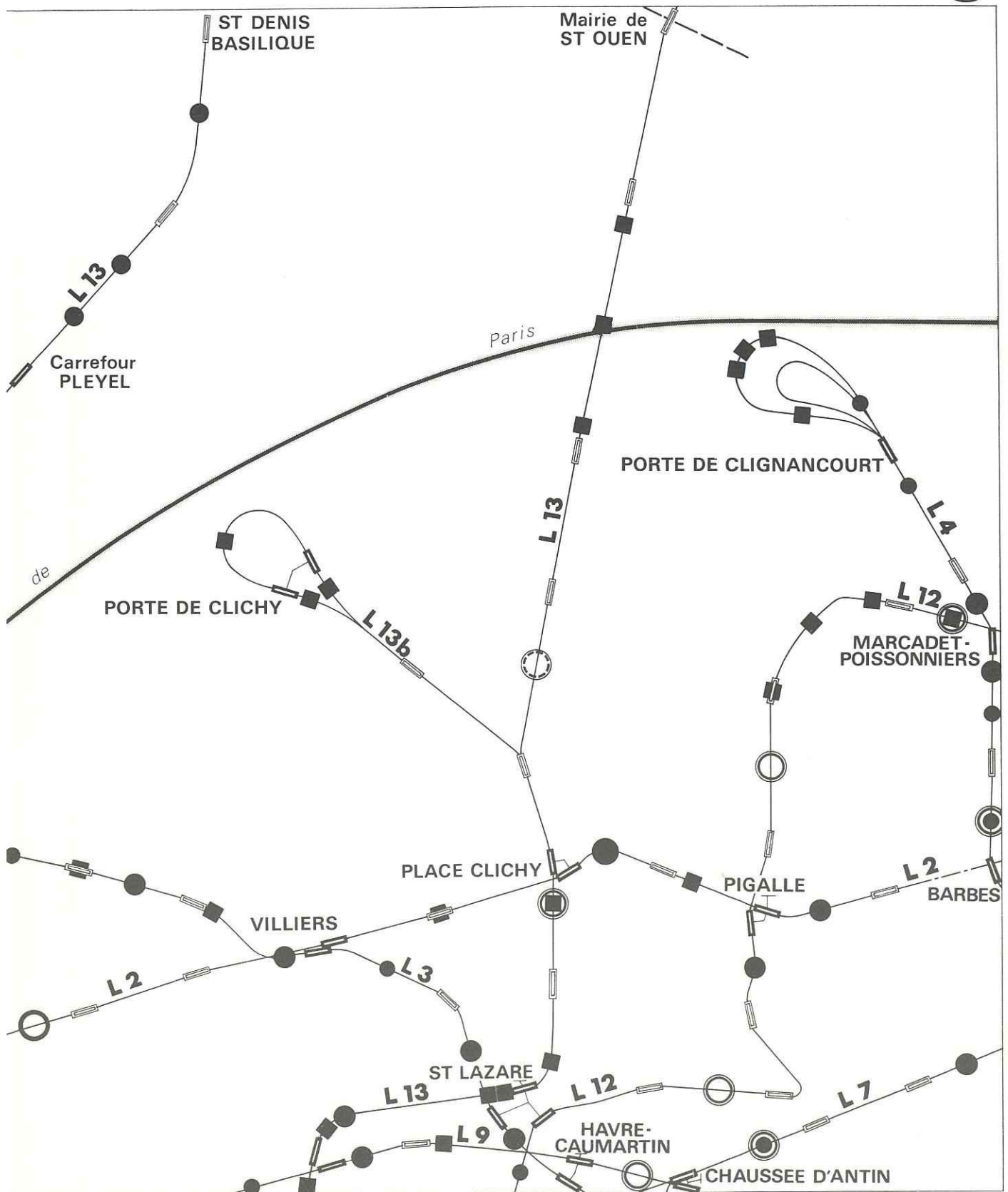
LÉGENDE

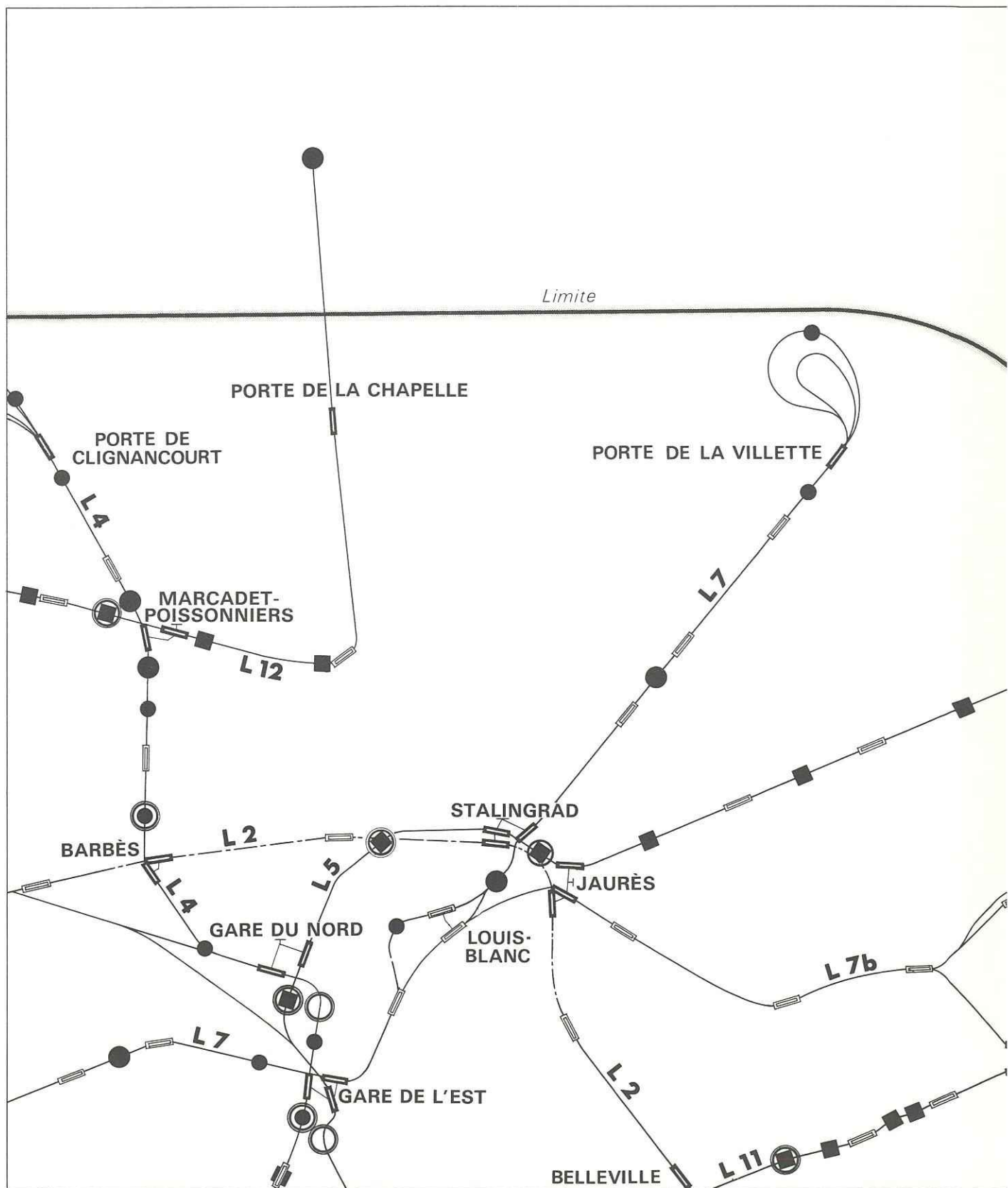
- ligne en construction
 - partie aérienne
 - ▬ station repère
 - ▬ station
 - débit $80\text{m}^3/\text{s}$
 - débit $60\text{m}^3/\text{s}$
 - débit $40\text{m}^3/\text{s}$
 - débit $\geq 80\text{m}^3/\text{s}$
 - $60\text{m}^3/\text{s} \leq \text{débit} < 80\text{m}^3/\text{s}$
 - $30\text{m}^3/\text{s} \leq \text{débit} < 60\text{m}^3/\text{s}$
 - débit $< 30\text{m}^3/\text{s}$
 - baie d'aération
 - mise en service prévue au 2ème semestre 1976
- } ventilateurs ou renforcements de débit en projet

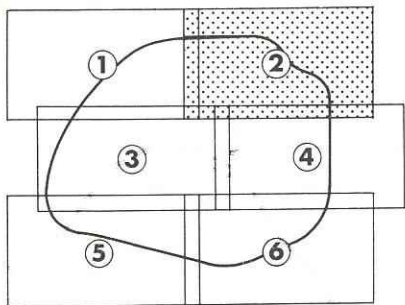




1



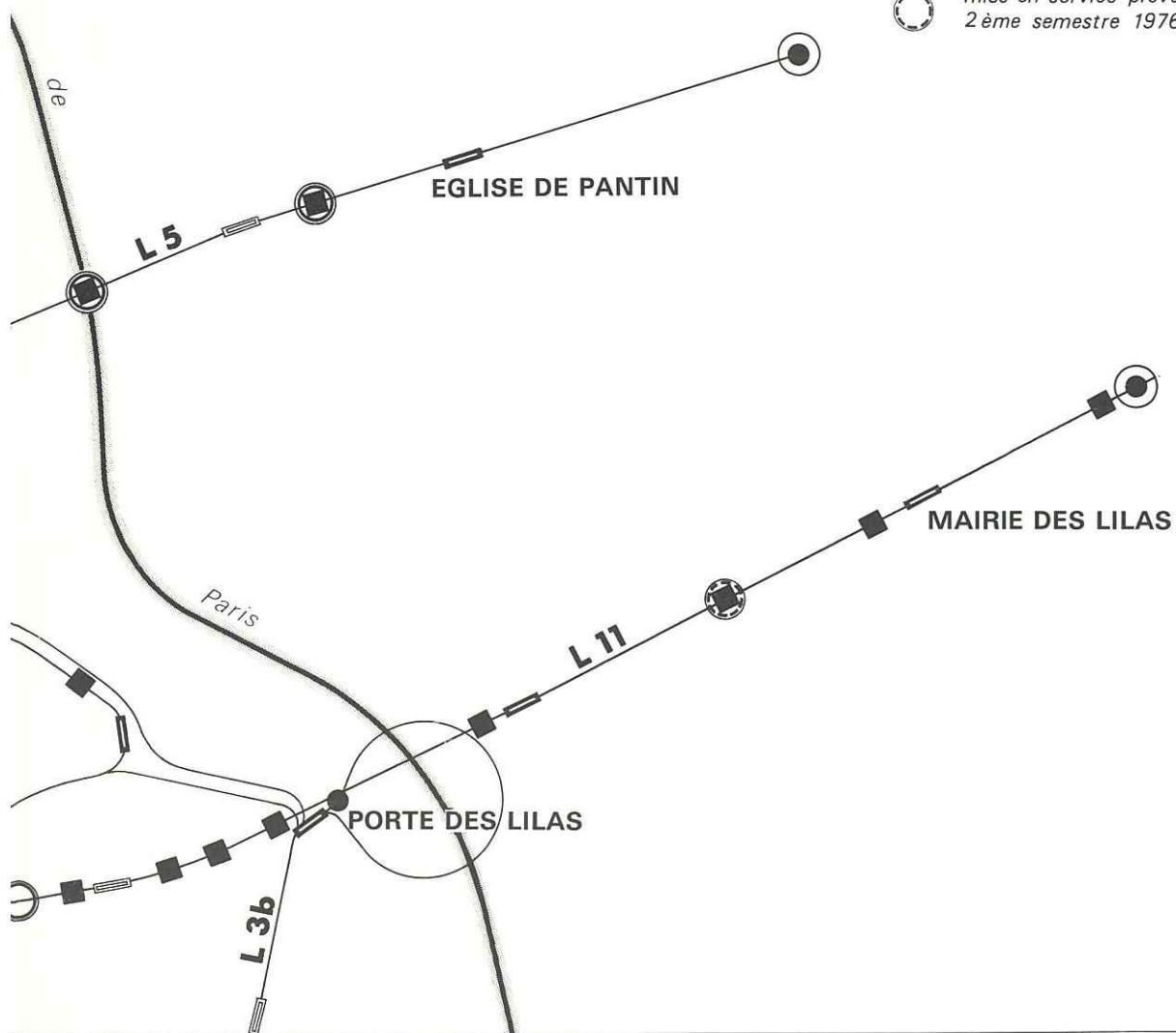


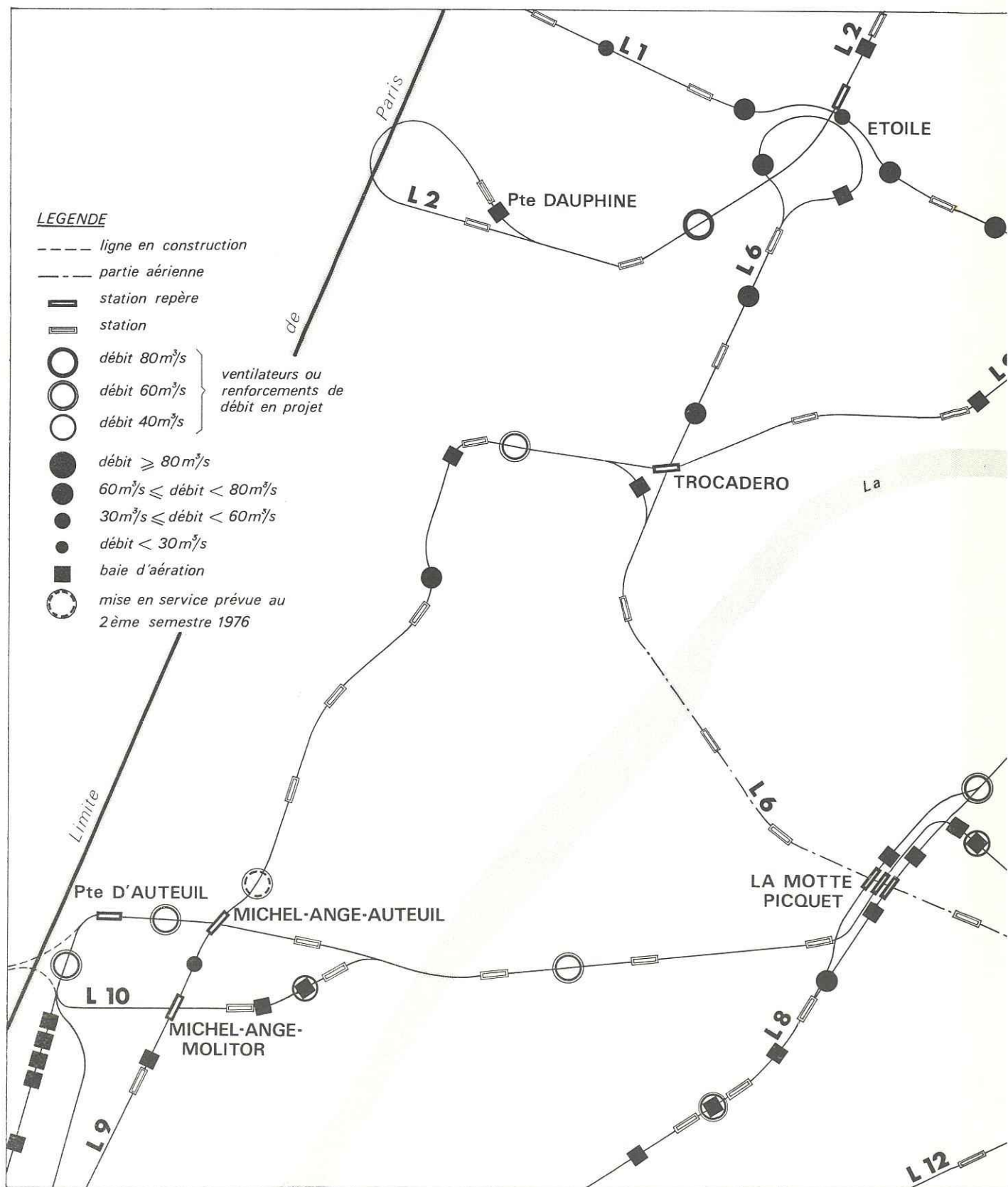


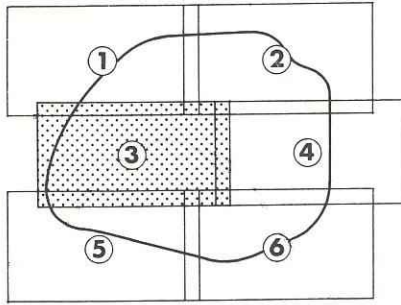
2

LÉGENDE

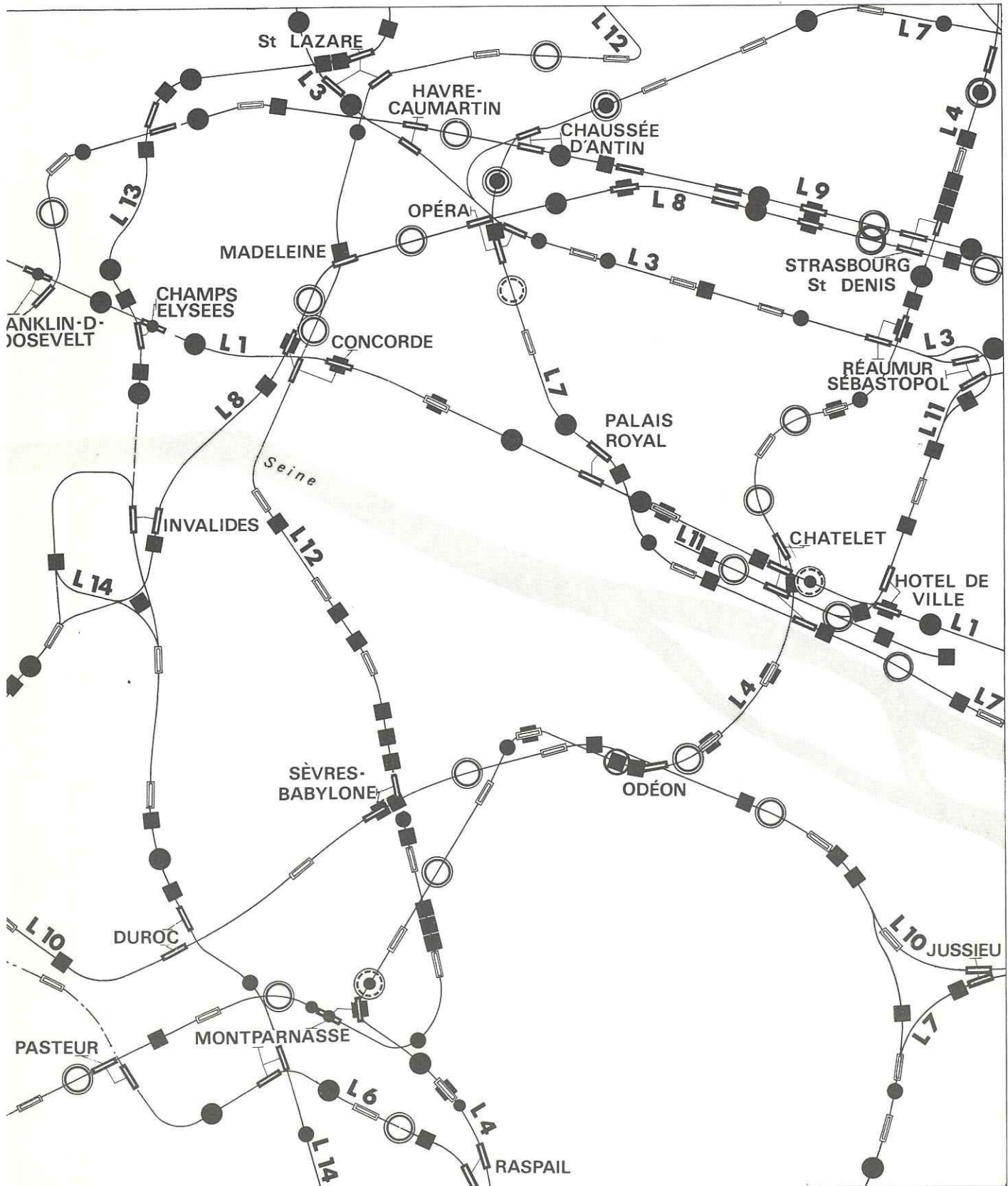
- ligne en construction
- partie aérienne
- == station repère
- ≡ station
- débit $80\text{ m}^3/\text{s}$
- débit $60\text{ m}^3/\text{s}$
- débit $40\text{ m}^3/\text{s}$
- débit $\geq 80\text{ m}^3/\text{s}$
- $60\text{ m}^3/\text{s} \leq \text{débit} < 80\text{ m}^3/\text{s}$
- $30\text{ m}^3/\text{s} \leq \text{débit} < 60\text{ m}^3/\text{s}$
- débit $< 30\text{ m}^3/\text{s}$
- baie d'aération
- mise en service prévue au 2^{ème} semestre 1976

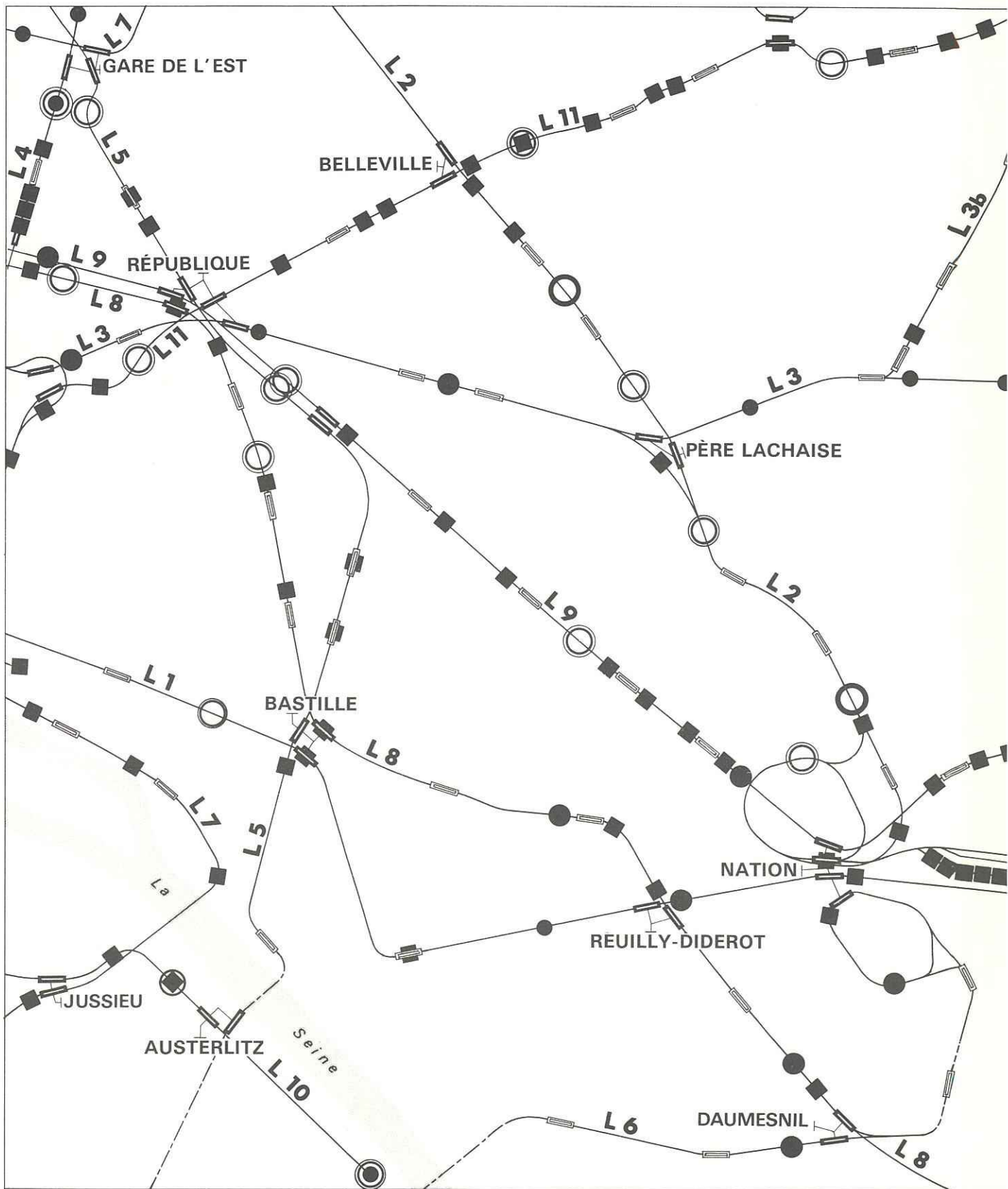


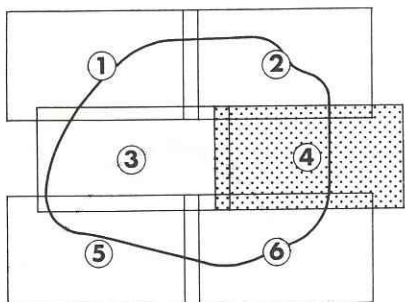




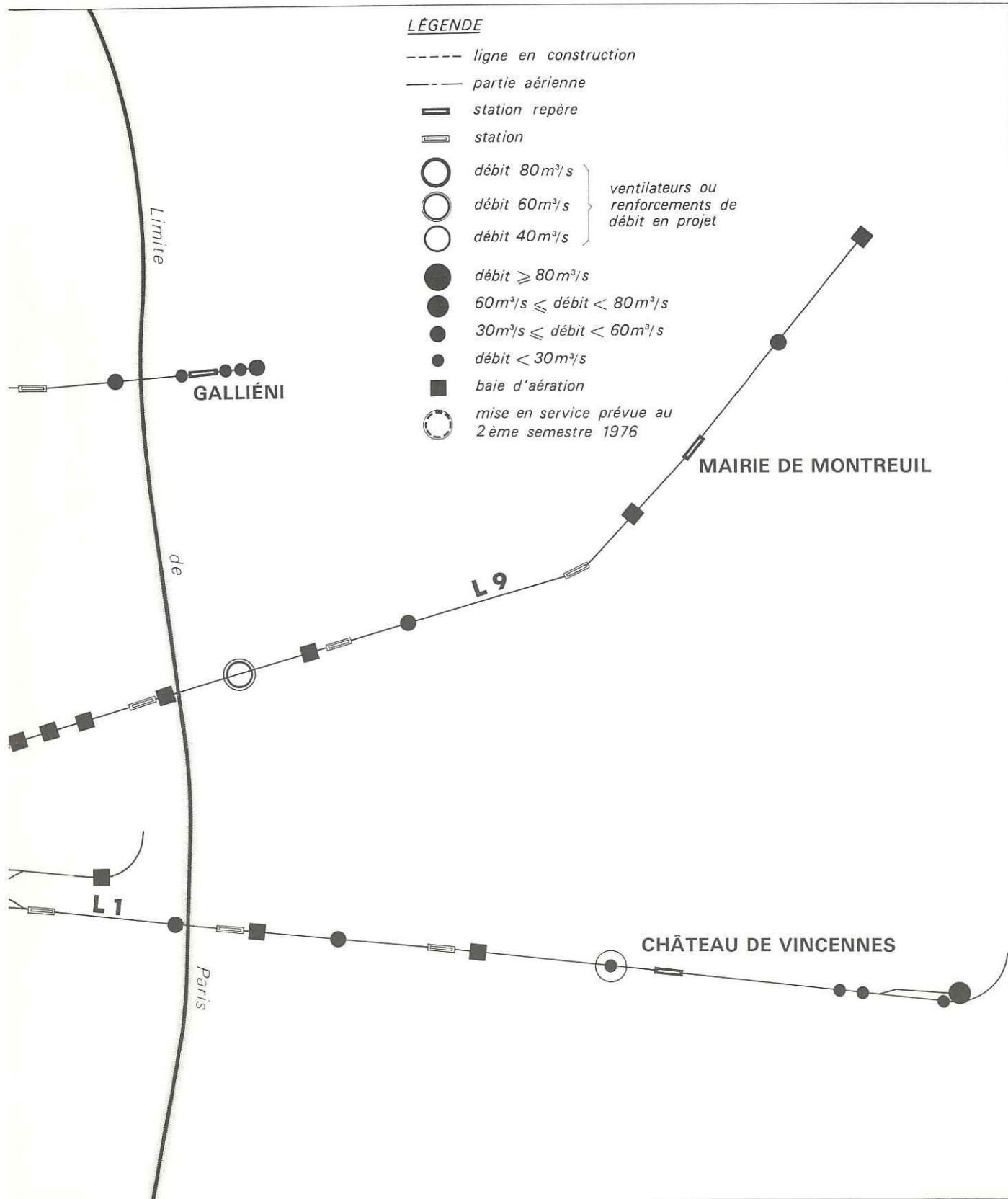
3

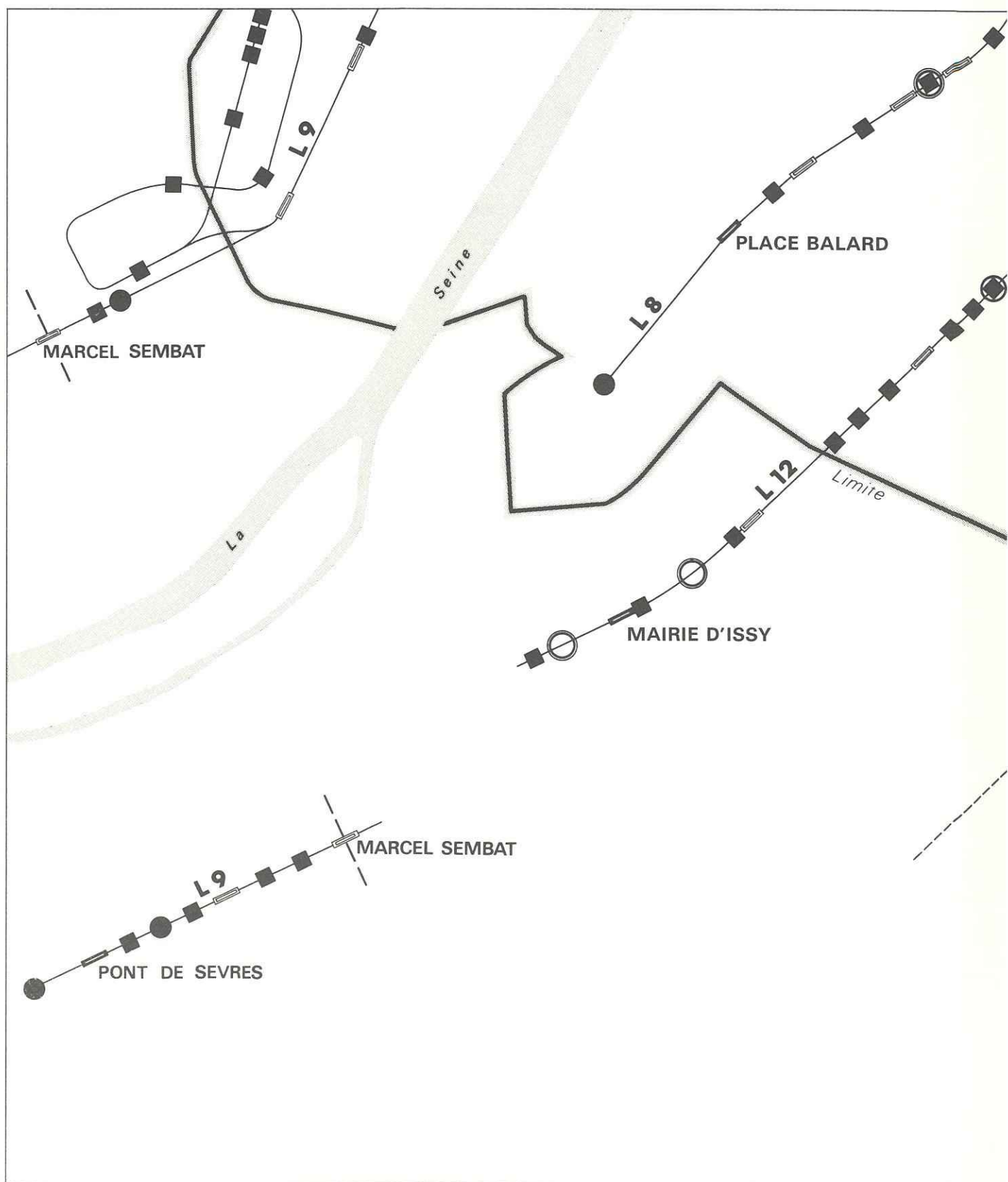


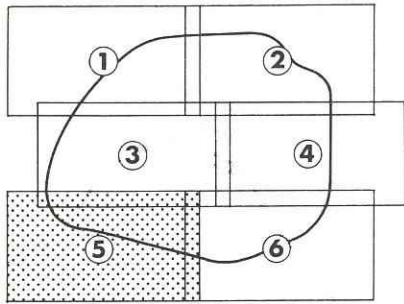




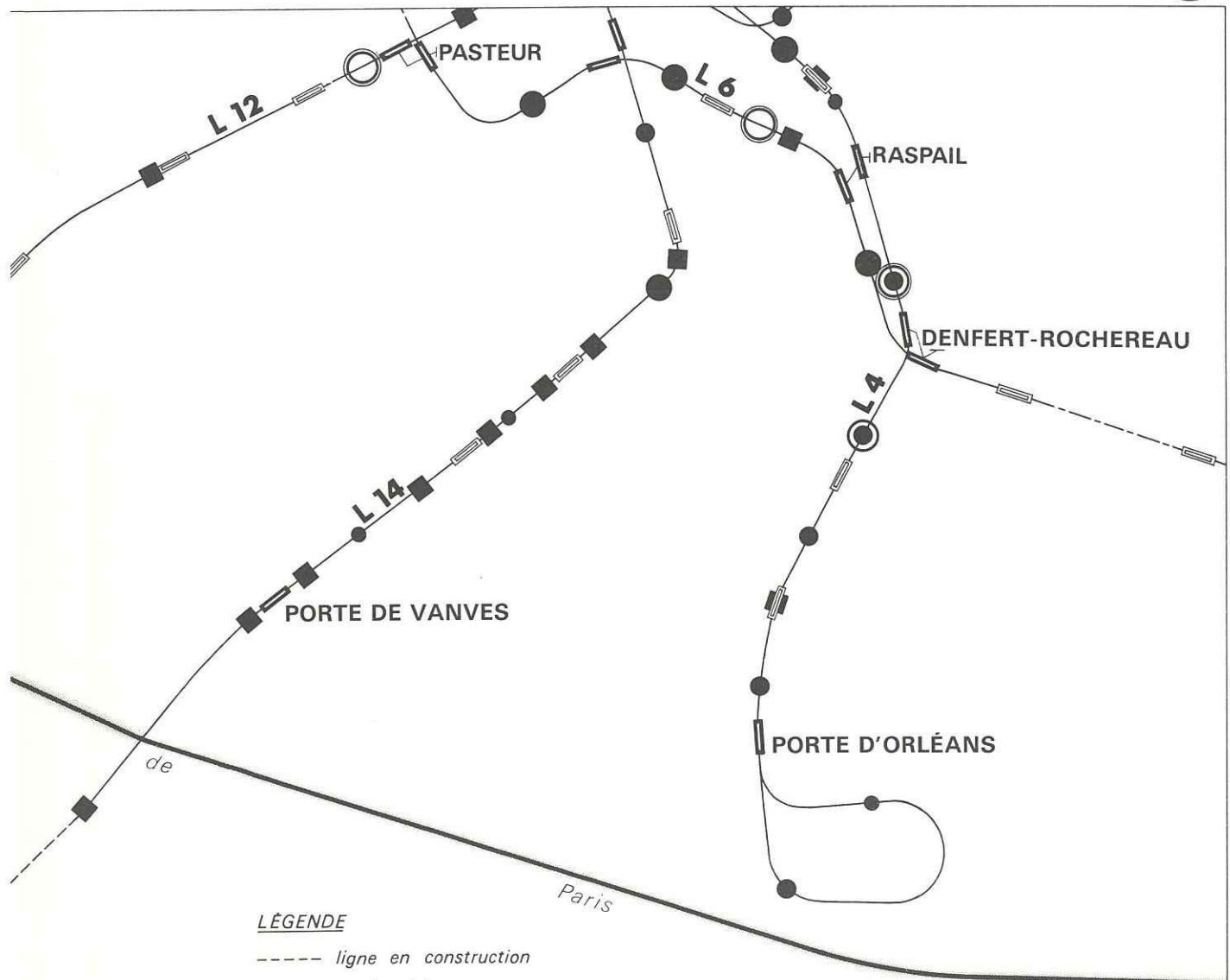
4





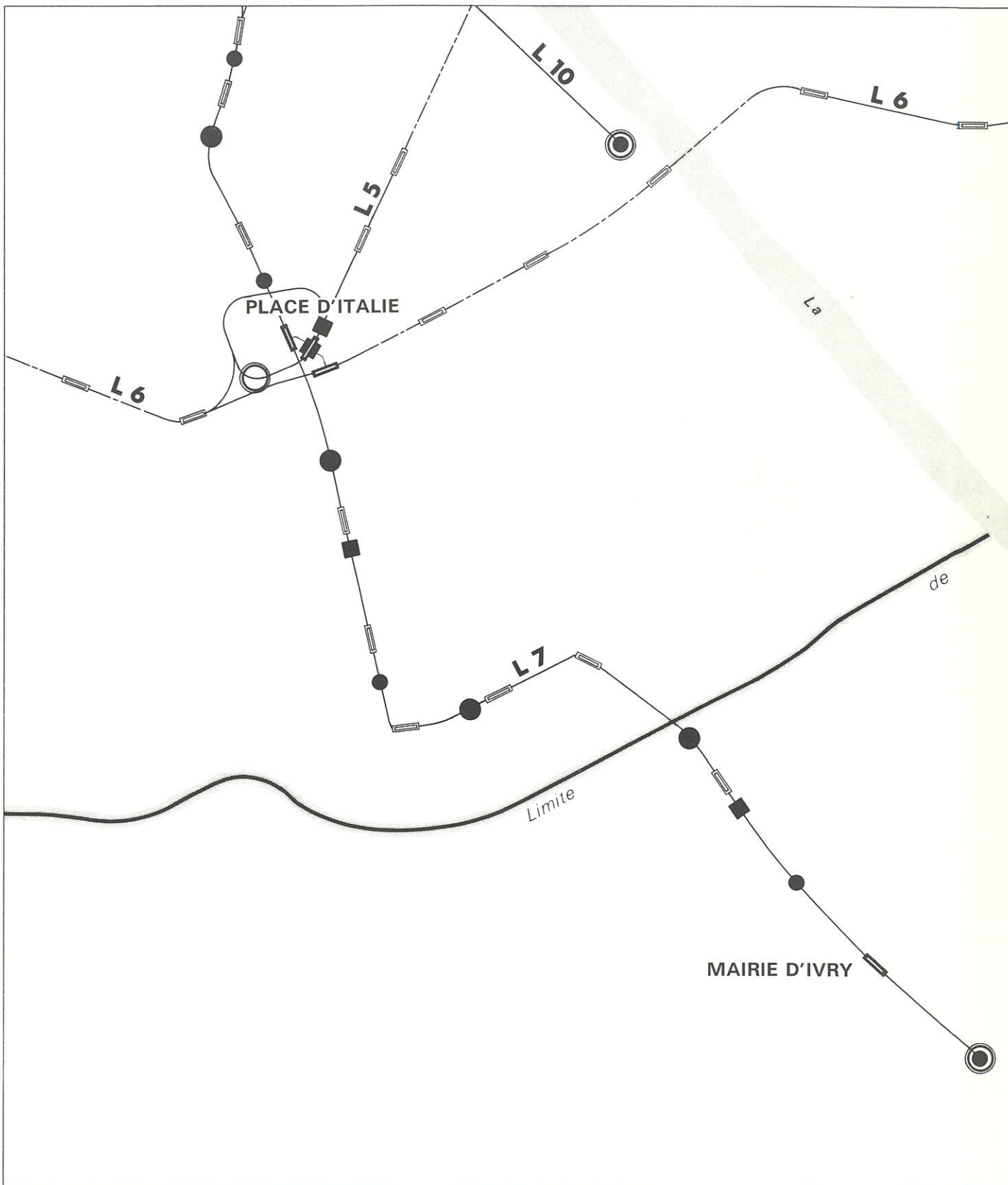


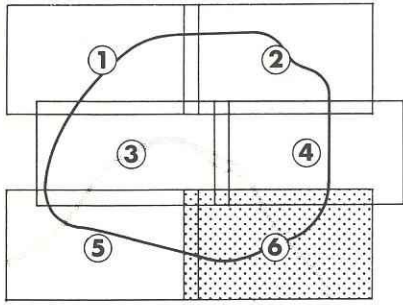
5



LÉGENDE

- ligne en construction
 - partie aérienne
 - == station repère
 - == station
 - débit $80 \text{ m}^3/\text{s}$
 - débit $60 \text{ m}^3/\text{s}$
 - débit $40 \text{ m}^3/\text{s}$
 - débit $\geq 80 \text{ m}^3/\text{s}$
 - $60 \text{ m}^3/\text{s} \leq \text{débit} < 80 \text{ m}^3/\text{s}$
 - $30 \text{ m}^3/\text{s} \leq \text{débit} < 60 \text{ m}^3/\text{s}$
 - débit $< 30 \text{ m}^3/\text{s}$
 - baie d'aération
 - mise en service prévue au 2^{ème} semestre 1976
- ventilateurs ou renforcements de débit en projet





6

