

CONCOURS D'INGÉNIEUR 2025

INTERNE

SPÉCIALITÉ « INFRASTRUCTURES ET RÉSEAUX »

OPTION « VRD »

ÉPREUVE DE PROJET

Métropole METING
Direction de la Voirie et des déplacements

Le 19 juin 2025

À l'attention de

Organisation des déplacements à l'échelle métropolitaine

La métropole METING en tant qu'AOM, autorité organisatrice des mobilités a en gestion la route à grande circulation dite rocade en périphérie de la ville centre INGEVILLE. Cet axe structurant permet la connexion avec 4 autoroutes et la desserte d'INGEVILLE par 17 échangeurs.

Les élus métropolitains envisagent de faire évoluer cette infrastructure pour répondre aux nouvelles pratiques de mobilité telles que le covoiturage, la multimodalité des déplacements mais également de réduire les nuisances qu'elles génèrent, particulièrement les nuisances sonores parallèlement à la mise en place d'une ZFE- M (zone à faible émission mobilité) à l'intérieur de la rocade.

E tant qu'ingénieur de la direction des routes, il m'est demandé d'étudier au travers de 5 questions les sujets suivants :

- Mise en place du dispositif ZFE- M (fiche projet et arrêté)
- L'étude d'une solution technique d'enrobé phonique pour diminuer les nuisances sonores et sa mise en œuvre par une planification des travaux
- Une note sur la mise en place d'une voirie réservée au covoiturage sur cette infrastructure
- La création d'arrêts sur voie rapide pour permettre l'interconnexion avec les lignes de tramway transitant en dessus de la rocade
- Préciser le mode de fonctionnement d'un système d'exploitation dynamique

Question 1-a

Fiche projet : dispositif ZFE-M

Objectifs :

- Obtenir une qualité de l'air saine pour les citoyens
- Réduire l'impact automobile sur le réchauffement climatique

Chiffres :

- En 2023, 11 métropoles étaient concernées par la mise en place d'une ZFE (zone à faible émission). Cependant, le déploiement s'étend à un nombre croissant de villes au-delà des grandes métropoles.
- 42000 à 97000 morts prématurés par an (rapport d'information du Sénat, dus à l'exposition continue aux particules fines).

Contexte règlementaire :

- Loi LOM (loi d'orientation mobilités) : définit et permet la mise en place de moyens pour réussir la révolution de la mobilité durable ; remplace la ZCR (zone à circulation restreinte) par la ZFE par l'article 86 promulgué en décembre 2019 ; l'obligation de concertation, de contrôle, d'organisation et de financement.
- Décret du 16 septembre 2020 : vient renforcer la loi LOM en renforçant les obligations, les évaluations des GES (gaz à effet de serre) et le dépassement des valeurs limites autorisées en particules et dioxyde d'azote.
- La loi climat et résilience adoptée en 2021 prévoit l'instauration de ZFE pour toutes agglomérations de plus de 150000 habitants au plus tard au 31 décembre 2024 et l'interdiction progressive des véhicules les plus polluants pour l'ensemble de la France. Cette obligation ne s'applique pas à INGEVILLE = 150000 habitants mais la politique publique peut la mettre en œuvre.
- Loi du 22 août 2021 « lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets » : l'objectif est de réduire le changement climatique et atteindre les quotas définis par l'accord de Paris et le pacte vert européen.

Mise en place d'une ZFE-M :

1. Évaluation de l'état de l'air dans le temps : réalisation de relevés et d'analyse avant la mise en place de la ZFE, de la qualité de l'air ; installation des capteurs.
2. Planification des objectifs à atteindre :
 - permet d'analyser les changements liés à la mise en place et à son évolution : évolution du parc véhicules des résidents, kilomètres parcourus par les transports en commun, évolution moyenne du trafic routier et cyclable
 - de définir l'évolution du dispositif
3. Délimitation de la zone géographique
4. Définition des critères d'accès :
 - définir quels sont les véhicules autorisés dans la zone et les exceptions (en fonction des jours/heures ; transport collectif, livraison...)
5. Sensibilisation de la population :
 - l'information des résidents sur les enjeux de la qualité de l'air est primordiale pour faire accepter la mise en place de la ZFE-M
 - communication éducative pour promouvoir les transports en commun, le vélo, les déplacements à pied, les nouveaux aménagements (parking-relais...)
6. Mise en œuvre du dispositif :
 - implantation de signalisation spécifique verticale reprenant les critères d'accès (définis en 4) et horizontale
 - peut être accompagné de panneaux à messages variables et d'action pour fluidifier le stationnement (application, places réservées aux véhicules électriques, arrêt-minute...)
 - marquage des véhicules (vignette crit'air)
7. Surveillance des seuils admis :
 - mesure de la qualité de l'air et la surveillance des conditions atmosphériques par la mise en place d'un maillage de capteurs à différents endroits de la ZFE-M
8. Réévaluation continue des objectifs :
 - permet de mesurer l'efficacité et d'adapter aux évolutions environnementales et sociales et aux progrès technologiques

Question 1-b

La mise en place d'une ZFE-M nécessite également la prise d'un arrêté instaurant la mise en place. Cet arrêté devra comporter les éléments suivants :

1. Vu : reprend le contexte réglementaire incluant les différents codes, les lois, les délibérations, les arrêtés, les avis positifs et négatifs des communes de la métropole et des instances
2. Considérants : reprend les éléments de contexte amenant à la mise en place de la ZFE-M, incluant les éléments de santé publique, de justice, d'obligations réglementaires et ses pénalités, les nécessités de faire/limiter...
3. Articles de l'arrêté indiquant :
 - a) La réglementation
 - b) La localisation et les périmètres de la ZFE-M ainsi que sa date de mise en application, les catégories de véhicules concernées et les conditions d'accès (classement Crit'air, les jours et heures si non permanent tous les jours)
 - c) Le référentiel de conditionnalité d'accès : certificat Crit'air et les conditions d'affichage
 - d) les conditions de levée du dispositif : exemple : blocage de l'axe majeur avec définition des conditions de mise en place de la levée temporaire du dispositif
 - e) les exemptions permanentes : liste des exemptions à l'article b) (ex : transport en commun, véhicules de secours, livraison,...)
 - f) les exemptions temporaires à caractère général
 - g) les exemptions temporaires à caractère individuel
 - h) la signalisation : définition de quelle manière les entrées et sorties de la ZFE seront indiquées et mis en place par qui
 - i) le contrôle : modalités permettant le contrôle (vignette Crit'air, ou dérogations...)
 - j) les sanctions : définir les verbalisations en cas de manquement aux obligations ou aux violations des interdictions
 - k) les publications : définir que l'arrêté sera publié et diffusé (avec la liste)
 - l) délais et recours
 - m) exécution : définit les acteurs chargés de l'exécution de l'arrêté
4. les annexes
 - a) le plan de la ZFE-m
 - b) les voies exclues du périmètre ZFE-M

Question 2

Dans le cadre du plan de prévention du bruit et de l'environnement métropolitain (PBE), le président de la métropole METING s'est engagé à lutter contre les nuisances sonores sur le territoire. La rocade représente un axe structurant du territoire, l'étude de mise en place d'un enrobé phonique est demandée.

a) L'enrobé phonique

I. Définition

L'enrobé phonique est un enrobé présentant une formulation spécifique (granulométrie, liant) permettant de diminuer l'impact sonore de la circulation sur la route par l'absorption acoustique des sons par le revêtement.

II. Performances attendues

Les performances attendues par l'enrobé phonique sont :

- Acoustique, avec la réduction des mesures de bruit au passage et en champ proche : de 6 à 10DB (A) dans les 2 cas par rapport à un enrobé classique.
- D'adhérence pour limiter les risques d'accident lors de freinages (aquaplaning, meilleur contact, pneu/route).

- Mécanique pour qu'il dure dans le temps (tenue à l'orniérage, au cisaillement, la dureté, la rugosité, de texture...)
- De préservation des ressources (matériaux utilisés et son propre recyclage)
- D'aspect et de confort (confort pour l'automobiliste et aspect visuel) mais également sur son impact sur la viabilité hivernale améliorée (verglas diminué à inexistant).

Le CCTP inclura : acoustique (6 à 10 dB (A) sous une circulation à 90 km/h ; adhérence (absence d'eau en surface) ; mécanique (teneur en vide entre 24 et 30%, texture > 0.5 au test de la macrorugosité) ; adhérence (CFT à 60 km/h = entre 0.7 et 0.8, coefficient de frottement transversal) ; préservation des ressources (épaisseur d'application faible, moins de matériaux extraits et déplacés → impact fort sur l'environnement, le revêtement devra être recyclable, devra inclure des matériaux recyclés dans sa composition).

b) Estimation des travaux

- Le linéaire de voie à traiter = 28 km = 28000
- Type de voie : 2x2 voies
- Largeur de voie : 3.5m
- Surface à traiter : $28 \times 2 \times 3.5 = 392000 \text{ m}^2$

Dans l'hypothèse où :

- Les matériaux en place ne comportent ni HAP ni amiante
- Les travaux pourront se réaliser de nuit
- Absence de traitement de la bande d'arrêt d'urgence (car non circulée) pour optimiser les coûts/impacts
- Absence de traitement des échangeurs
- Installation de chantier : 3% + signalisation 2% coût travaux
- Rabotage de chaussée : 1€ HT :m²
- Enrobé phonique : 20€ HT / m²
- Signalisation temporaire juste après les enrobés (peinture) : 1.5€ HT : ml
- Signalisation définitive après le déshuilage des enrobés / résine : 30 HT / ml

Le poste installation de chantier comprend toutes les démarches de la préparation de chantier (planning opérationnel, demande d'arrêt, démarche sécurité PPSPS,...)

Le poste signalisation est coûteux sur ce type de travaux car il nécessite une signalisation conséquente pour sécuriser les salariés et les usagers de la route.

Soit :

- Rabotage : $1€ \text{ HT} / \text{m}^2 \times 392000 \text{ m}^2 = 392000€ \text{ HT}$
- Enrobé phonique : $20€ \text{ HT} / \text{m}^2 \times 392000 \text{ m}^2 = 7840000€ \text{ HT}$
- Signalisation : $20000 \text{ ml} \times 2 \text{ voies} \times 3 \text{ bandes} = 168000 \text{ ml}$
Temporaire : $168000 \times 1.5€ \text{ HT} = 252000 € \text{ HT}$
Définitive : $168000 \times 3€ \text{ HT} = 504000 \text{ HT}$

Sous-total = 8988000€ HT

- Installation de chantier 3% de 8988000€ = 269640€ HT
- Signalisation de chantier 2% de 8988000€ = 179760€ HT

Total HT = 9437400€

TVA = 1887480€

Total TTC = 11324900€

c) Planification temporelle des travaux

Les contraintes données étant :

- Fermeture complète d'un sens de circulation possible entre 22h et 6h du matin
- Obligation de maintenir 2 voies de circulation par sens
- Fermeture des échangeurs possibles mais avec mise en place de déviation
- La longueur maximale du tronçon de travaux étant de la longueur entre les échanges autoroutiers Ax1 et Ax4

Calcul de la longueur maximale du tronçon : sur la base de l'annexe A sans échelle à partir d'un ratio représentation graphique du tracé rocade = 28km.

La longueur entre Ax1 et Ax4 serait environ 7.2km. Je partirai sur un tronçon maximum de 7km pour simplifier les calculs et assurer une marge possible.

La planification des travaux proposée serait celle utilisée pour le renouvellement des bandes de roulement des autoroutes soit des travaux de nuit.

Les travaux de rabotage, de réfection et de signalisation se feront par tronçon complet. Cette planification limite l'impact sur la circulation et offre également un environnement plus sécurisé pour les entreprises intervenantes. Une réalisation dans le sens de circulation facilite l'approvisionnement et diminue les risques.

Soit 28km à traiter, on définit 4 phases de travaux par sens.

Il est proposé de faire un sens puis un autre pour limiter les déplacements de l'atelier enrobé. Le linéaire de la phase sera adapté pour commencer et se terminer entre les 2 voies de l'échangeur permettant ainsi de contraindre l'échangeur concerné que sur sa moitié (ex : lors de la phase 1, l'entrée par l'échangeur A reste possible).

[schéma non reproduit]

d) Stratégie de commande publique

Le montant des travaux étant estimé à 9437400€ HT et le pilotage de l'opération sous maîtrise d'œuvre privée étant souhaité, la métropole METING devra opérer 2 procédures d'achat public.

La première concernera la mission de maîtrise d'œuvre (MOE), le coût des travaux étant estimé à 94137400€ HT, l'estimation du coût de maîtrise d'œuvre privée est régulière de 7% du coût des travaux, soit une estimation MOE = 660618€ HT.

Considérant ce coût de MOE, la procédure à adopter sera un appel d'offre ouvert (marché de fourniture et services, coût > à 221000€ HT + BOMP + SOUE et nécessitera la publication du marché aux journaux officiels.

La 2^{ème} procédure concernera les travaux : 94307000€ HT estimés est supérieur au seuil des procédures adaptées (MAPA) :

inférieur à 100000€ HT gré à gré jusqu'au 31 décembre 2025,

inférieur à 5382000€ HT MAPA

supérieur à 5382000€ HT appel ouvert.

La procédure marché public pour les travaux sera un appel d'offre ouvert avec publication du marché aux journaux officiels également.

Pour ces 2 procédures, les délais entre la définition des besoins et la notification sont souvent de 4,5 à 5 mois.

Définition du besoin, 1 mois,

Échange avec le service, commande publique, 15 jours.

Publications du marché,

Consultation des entreprises, 30 jours minimum, soit 1 mois.

Analyse des offres, 1 mois peut être plus si on ouvre aux variantes.

Relecture par la commande publique et transmission en amont aux membres de la CAO, (Commission d'appel d'offres), 15 jours.

CAO, 1 jour,

Rejet, aux entreprises non retenues.

Notification à plus de 10 jours.

Question 4

La rocade présente un croisement par des ouvrages dénivelés de 3 lignes de tramway mais également la circulation de plusieurs lignes de transport collectif interurbain sur cette dernière.

Afin de renforcer l'intermodalité des transports, l'étude de l'intégration d'arrêts de transport en commun sur la voie rapide est demandée.

- a) Conditions de réalisation d'arrêt de transport en commun en section courante de voies à caractéristiques autoroutières

Le dispositif doit comprendre :

- 2 arrêts avec plateforme autoroutière aménagés hors de la chaussée principale
 - Un arrêt par sens de circulation
 - Une liaison entre les arrêts (ouvrage de franchissement supérieur ou inférieur – passerelle ou tunnel)
 - Idéalement une liaison avec le réseau local de transport en commun ou pôle d'échange multimodal (PEM) pour permettre l'intermodalité avec les autres modes de déplacements
 - Une bretelle de sortie, d'une voie de desserte sur l'arrêt se positionne l'arrêt, une bretelle d'entrée sur la voie à caractère autoroutière
 - Un terre-plein central latéral en section courante équipé d'un dispositif de retenue routier
 - La bretelle d'accès doit permettre d'accéder à la voie de desserte à 50km/h (décélération 90=>50 km)
 - La bretelle d'entrée sur la voie à caractère autoroutier doit permettre de s'insérer dans le flux de la circulation circulant à +0km (50=>90km accélération et insertion),
 - en fonction du nombre de lignes passant par ses arrêts, 2 zones d'accostage sur le quai pourront être nécessaires
 - la structure de la chaussée et particulièrement le revêtement devront pouvoir répondre aux sollicitations mécaniques importantes (décélérations et accélérations répétées des véhicules de transports en commun) en prenant en compte le flux de passage, aux sollicitations spécifiques aux zones d'arrêt (orniérage et arrachement principalement) ;
 - les bordures de quai devront être adaptées pour permettre l'accessibilité des PMR, le choix de bordure incluant l'aide à l'accostage (guide roue) est à privilégier car elle diminue l'espace entre le châssis du bus et le haut du quai (limitation des risques)
 - une zone d'attente voyageur à adapter en fonction de l'affluence des voyageurs, la fréquence des transports en commun...
 - sécuriser la correction entre les arrivées des liaisons piétonnes et la voie dédiée aux transports en commun (barrières, rail, ou tout autre dispositif ne permettant pas d'accéder à la voie bus)
 - un abribus pour le confort des usagers en attente
 - l'ensemble des aménagements (le quai, les cheminements, la zone d'attente,...) doivent être accessibles aux personnes à mobilité réduite (une attention sera portée particulièrement sur les pentes en long des liaisons avec les autres moyens de transport, ou ascenseur).
- b) A l'intérieur de la copie 17 : croquis [non reproduit]
- Données :
- On considère que pour dimensionner les voies de décélération et d'accélération, il faut se référer aux guides 90/110 et à l'ICTAAL.
- Soit :
- Voie de décélération = sortie de déboitement 150m avec une réduction possible à 110 lorsque V90

- Voie d'accélération = entrée en insertion 200m avec réduction possible à 150m + 1 biseau de 75m
- La zone bordurée de part et d'autre de l'encoche d'arrêt est de 50m mini en amont et 20m mini en aval
- La voie de desserte aura une largeur de section circulée de 3m accompagnée d'un dégagement gauche de 0.5m avant le terre-plein latéral et d'un dégagement droit de 0.5m (accotement borduré) et un profil en travers vers la droite de 2.5%
- Hypothèse pour les zones de transition amont et aval pour passer de 50 à 10km/h
50km/h =>13.9m/s
Hypothèse = 50m

⇒ 110 + 50 + 50 + 2 arrêts de bus [3 biais +18+18+3 biais]+20+50+150+75 = 547m

Question 5

Dans le cadre de la signature du contrat plan entre l'État et la métropole METING, la mise en place d'un système d'exploitation dynamique sur la rocade Est est à l'étude.

Le système d'exploitation dynamique repose sur la mise en place de régulation de la vitesse sur les axes en 2*2 voies, permettant ainsi de donner des consignes variables de vitesse à respecter. Ces consignes sont adaptées aux conditions de circulation sur la section de réseaux routiers concernés et sont transmises aux automobilistes par le biais de signalisations à messages variables en temps réel. Les équipements sont positionnés régulièrement ainsi qu'aux différents accès de la section dite « régulée ».

Lorsque le trafic monte en charge et approche de la saturation, un message est envoyé sur les panneaux à messages variables pour réduire les écarts de vitesse entre les voies de circulation, éviter les changements de voie. Cette régulation permet ainsi d'utiliser la pleine capacité de l'infrastructure est d'optimiser son fonctionnement par :

La diminution des bouchons,
l'augmentation du débit moyen,
la diminution des temps de parcours,
rendre plus linéaire la vitesse individuelle,
améliore la sécurité par la diminution des freinages brutaux et des changements de voies, :
a un impact sur l'émission des GES et autres polluants générés par les véhicules à l'arrêt ou changeant de régime.

Le système d'exploitation dynamique, pour être pertinent, doit s'appliquer sur au moins 5 km et que la baisse des vitesses pratiquées soit effective.

La mise en œuvre consiste en l'installation de différents équipements nécessaires au fonctionnement :

Des capteurs permettant le recueil des données de trafic en amont et en aval de la section régulée, accompagnés ou non de vidéosurveillance.

Une signalisation dynamique composée de différents panneaux à messages variables, positionnés de part et d'autre des voies ou au-dessus des voies sur un portique.

Une signalisation de police permanente, panneau classique qui indique les entrées sorties de la zone régulée, ainsi qu'un rappel de la vitesse en sortie de zone régulée.

Des boucles pour le comptage des véhicules, collecte de données.

L'exploitation du système d'exploitation dynamique est réalisée après une étude détaillée du fonctionnement de la section à réguler souhaitée.

Un paramétrage de plusieurs algorithmes est réalisé en incluant la prévention de la congestion, la protection des queues de bouchon ainsi que l'harmonisation des vitesses à respecter.

Une fois le paramétrage défini et les données de trafic en instantané collectées, des vitesses par voie peuvent être envoyées au panneau à messages variables.

Enfin, le système n'a d'intérêt que s'il est évolutif et pertinent. Afin de le faire évoluer, il est important de réaliser des évaluations du système sur les données de circulation à partir d'indicateurs comme le cumul de kilomètres de bouchons constatés, le débit moyen écoulé aux heures de pointe, le temps de parcours, la vitesse l'accidentologie.

Ces données sont collectées à partir des capteurs, boucles électromagnétiques ou systèmes de comptage routier ou d'observation vidéo mais également des chiffres d'accident d'accidentologie par le recueil des analyses d'accidents corporels et les mains courantes du gestionnaire lors de ses interventions.

Question 3

Métropole METING
Direction de la voirie et des déplacements

Le 19 juin 2025

A l'attention du Président de la métropole METING

Voie Réservée au covoiturage

Les changements en matière de mobilité sont nombreux et les usages évoluent. Cependant, dans un contexte d'intensification du trafic, l'optimisation du trafic sur les 2*2, voies ceinturant Ingéville est nécessaire. Une réflexion est en cours concernant la mise en place d'une voie réservée au covoiturage aux heures de pointe sur cette infrastructure. En tant qu'ingénieur de la direction des routes je vous propose au travers de cette note d'étudier la faisabilité de mise en œuvre

I-

Le matériel à installer

Pour la mise en place de la voie réservée au covoiturage, mais aussi aux autres véhicules d'occupation multiples (taxi, transport en commun, ..), cela nécessite la mise en place de signalisations à minima permanente (panneau de police) indiquant que la voie est réservée et dans quelles conditions (horaires, jour, véhicules concernés).

Dans l'idéal, les panneaux à messages variables pourront être couplés à un système d'exploitation dynamique afin d'optimiser l'utilisation de cette voie covoiturage, mais également d'un système de contrôle de l'occupation des véhicules permettant de faire respecter l'utilisation de cette voie de type radar fixe.

L'installation des panneaux permanents nécessite des travaux d'implantation de signalisation verticale classique et des démarches administratives simples (déclarations de travaux, consultations d'entreprises suivi de travaux).

Concernant l'implantation des panneaux à messages variables et le radar de contrôle d'occupation. Ce dernier nécessite des travaux plus conséquents avec la réalisation de travaux de réseau alimentation électrique, informatique pour permettre la communication depuis un centre de gestion. Une consultation des concessionnaires pour connaître les disponibilités en réseau est également nécessaire. Les travaux étant plus conséquents, un marché de travaux est nécessaire. Procédure de type MAPA (sauf si montant des travaux est supérieur à 5 382 000€ hors taxes). Les démarches de travaux restent les mêmes pour la partie administrative, mais le suivi de travaux est plus compliqué par la nécessité de réaliser des tranchées pour interconnecter les différents éléments. Des démarches auprès de la préfecture et de l'État seront nécessaires pour l'implantation du radar d'occupation et la mise en place de la verbalisation.

Enfin, l'exploitation future de ces types d'équipements nécessite une expertise dans le domaine de la régulation de flux, mais aussi dans la maintenance de matériel et des systèmes d'exploitation. Une délégation de service public incluant l'exploitation et la maintenance me semble la plus adaptée.

En fonction de la durée de la DSP et du nombre de tronçons mis en place, le montant pourrait être différent, ce qui pourrait induire 2 modes de passation de marché public. Si l'estimation de la DSP est inférieure à 5 382 000€ hors taxes, la métropole pourrait passer un marché de type MAPA (publication BOMP), si l'estimation est supérieure, le marché public de type appel d'offres ouvert (avec publication BOMP + JOUE)