

CONTOURNEMENT AUTOROUTIER D'ARLES

ACTUALISATION DES ÉTUDES ET ANALYSES AYANT CONDUIT À RETENIR LE FUSEAU SUD VIGUEIRAT

EXPERTISE DES VARIANTES SOUS-FLUVIALES COURTES ET LONGUES

Novembre 2020



DREAL PACA

Service
Transports,
Infrastructures et
Mobilités



**contournement
autoroutier d'Arles**



SOMMAIRE

1 - PRÉSENTATION DU PROJET D'ARLES ET DE LA PRÉSENTE EXPERTISE.....	4
1.1 - Le projet autoroutier d'Arles.....	4
1.2 - Statut de la présente expertise	4
1.3 - Présentation des deux options de passage sous fluviales.....	4
2 - ANALYSE COMPARÉE DES DEUX FAMILLES SOUS FLUVIALES	5
2.1 - Méthodologie d'étude	5
2.2 - Analyse détaillée des familles sous fluviales	5
3 - ACTUALISATION DES ESTIMATIONS.....	7
3.1 - Principes d'actualisation.....	7
3.2 - Estimations.....	8
3.3 - Comparaison avec les études antérieures.....	9
4 - ANNEXES	10
4.1 - Annexe 1 : Expertise des tunnels sous fluviaux du Rhône (14 mai 2020)	10
4.2 - Annexe 2 : Atlas cartographique.....	20

1 - PRÉSENTATION DU PROJET D'ARLES ET DE LA PRÉSENTE EXPERTISE

1.1 - Le projet autoroutier d'Arles

Le projet de contournement autoroutier d'Arles consiste à aménager un itinéraire de 26 km dont 13 km en tracé neuf à 2x2 voies et 13 km de réaménagement sur place de la RN 113 à l'Est d'Arles. Il assurera le dernier maillon de la continuité autoroutière entre l'Espagne, la France et l'Italie constitué par les autoroutes A9, A54, A7 et A8, et doit permettre ainsi de libérer la ville d'Arles du trafic de transit (de l'ordre de 45%) qui la traverse actuellement via la RN113.

Le projet a fait l'objet d'une longue préparation. Entre 1995 et 2013, un processus de travail et de concertation intense a été conduit par la DREAL en lien avec les élus, acteurs économiques locaux et associations locales.

En 2003, le CEREMA a réalisé l'étude préliminaire d'une variante consistant à un aménagement quasi sur place de la RN113 au droit d'Arles, avec une traversée sous fluviale du Rhône.

ATLAS CARTOGRAPHIQUE Familles de Passages : Vue d'ensemble

En 2013, l'évolution du contexte réglementaire, en lien avec le risque inondation, a obligé la DREAL et les équipes techniques à revoir de manière assez fondamentale le projet sur le tronçon concernant la traversée du Rhône. À partir de 2016, les nouvelles études hydrauliques et l'évolution des documents cadres (SDAGE et PGRI notamment) ont permis d'envisager la reprise des études préalables du projet.

En 2018, la direction des routes a demandé de reprendre les études préalables selon une option de passage au sud d'Arles (appelée Fuseau Sud Vigueirat).

1.2 - Statut de la présente expertise

En parallèle de la reprise de ces études préalables du contournement autoroutier d'Arles sur la base du tracé retenu franchissant le Rhône par un viaduc, il est demandé une actualisation des études et analyses ayant conduit à retenir ce tracé.

En particulier, il est demandé une expertise des études ayant conduit à écarter les fuseaux empruntant l'actuel tracé de la traversée d'Arles et franchissant le Rhône par un tunnel sous fluvial. C'est l'objet de la présente expertise.

La base de l'expertise est constituée par le dossier d'étude préliminaire des tunnels de mars 2003 réalisé par le CEREMA.

1.3 - Présentation des deux options de passage sous fluviales

La famille « sous fluviale courte » (VSFC) traversant Arles en souterrain

Elle se différencie des solutions ASP car elle s'enterre, à partir du carrefour de Vittier, sur environ trois kilomètres pour franchir le Rhône, le grand bassin et le canal d'Arles à Fos. Elle retourne à l'air libre au niveau du canal de la vallée des Baux. Le tracé souterrain étant destiné au seul trafic de transit, la RN113 assure alors les liaisons urbaines entre les quartiers situés sur chacune des rives du fleuve. Cette Option « variante sous-fluviale courte » (VSFC), implique le franchissement du fleuve à une profondeur modérée permettant la réalisation depuis la surface par excavation puis pose d'un cadre préfabriqué (constitué de caissons en béton, ensouillés dans les alluvions). Elle nécessite la suppression de l'échangeur d'Arles centre et des réaménagements complexes des échangeurs en amont des têtes de tunnel.

Nota : elle est dénommée V1 dans la note d'expertise CEREMA

1.3.2 - La famille « sous fluviale longue » (VSFI) traversant Arles en souterrain

Elle s'enterre, avant l'entrée d'Arles, sur environ cinq kilomètres sous le Rhône, sous le grand bassin, sous le canal d'Arles à Fos, sous le canal de la vallée des Baux. Elle retourne à l'air libre à la sortie d'Arles. Comme pour la VSFC, elle est dédiée au seul trafic de transit, la RN113 assurant le trafic local. Cette Option « variante sous-fluviale longue » (VSFI), permet d'envisager le franchissement par un tunnel foré profondément sous le lit du Rhône, allant jusqu'au substratum calcaire et limitant les travaux depuis la surface. Elle nécessite la suppression de l'échangeur d'Arles centre et des réaménagements complexes des échangeurs en amont des têtes de tunnel.

Nota : elle est dénommée V2 dans la note d'expertises CEREMA

ATLAS CARTOGRAPHIQUE Familles Sous Fluviales Rives Droite et gauche

2 - ANALYSE COMPARÉE DES DEUX FAMILLES SOUS FLUVIALES

2.1 - Méthodologie d'étude

2.1.1 - Les données

Les données des sections en Aménagement Sur Place sont issues du rapport d'étude d'actualisation des options de passage .

2.1.2 - La doctrine « Éviter, Réduire, Compenser » (séquence ERC)

La doctrine « Éviter, Réduire, Compenser » (séquence ERC) est utilisée pour conduire les analyses et les choix. Elle donne la priorité à l'évitement, puis à la réduction des impacts. Elle permet d'assurer la cohérence et la complémentarité des mesures environnementales prises au titre des différentes phases d'étude et des procédures.

C'est l'intégration de l'ensemble des thématiques d'enjeux le plus tôt possible dans la conception du projet qui est nécessaire pour concevoir un projet de moindre impact.

2.1.3 - Les thématiques d'étude

Les thématiques d'étude couvrent l'ensemble des fonctions stratégiques : Autoroutières (assurer la continuité autoroutière et améliorer la sécurité), Cadre de vie (contribuer à l'amélioration de la qualité de vie), Développement (contribuer au développement local), Environnement (préserver la relation entre le territoire et l'Homme), Réalisation (maîtriser la réalisation et les coûts). Les enjeux ont été identifiés, analysés et évalués par des spécialistes de chaque thème, à la fois par une qualification du territoire traversé et par des approches spécialisées pour approfondir certains sujets (trafics, hydraulique) ou systémiques destinées à comprendre le fonctionnement des milieux traversés. Pour chaque thématique, les options ont été appréciées et comparées. Ces appréciations sont argumentées et représentées graphiquement de manière à en avoir une vision synthétique.

2.2 - Analyse détaillée des familles sous fluviales

Fonctions et Objectifs	RN113 (sans projet)	Vsf Courte	Vsf Longue	
0 Réhibitoire , 1 Très mauvaise, 2 Plutôt Mauvaise, 3 Plutôt Bonne, 4 Bonne, 5 très Bonne				Commentaires relatifs aux Familles Sous Fluviales courtes et longues
Fonction Autoroutière : Assurer la continuité autoroutière et Améliorer la sécurité				
Capacité d'écoulement du trafic	Capacité limitée	Très bonne	Très bonne	
Libilité de l'itinéraire par les usagers	Plutôt Mauvaise (caractéristiques non homogènes)	Bonne (caractéristiques autoroutières et V 110 km/h)	Bonne (caractéristiques autoroutières et V 110 km/h)	2*3 voies en tunnel , voie droite utilisée PL, pas de VSR en sortie (trémies) Le GC du tunnel ne peut être élargi , les trafics pris compte pour dimensionner les PenT sont donc ceux à très long terme (40 ans) : 3 400 uvp dont 1600 PL à la 30ème heure à long terme / 57 000 TMJA à long terme(évaluation 2058)
Qualité du service d'exploitation	Moyenne (Difficulté pour gérer les événements accidents,bouchons...)	Très bonne (incertitude sur les TMD,coûts d'exploitation)	Très bonne (incertitude sur les TMD,coûts d'exploitation)	Les dispositions préconisées en cas d'incendie dépendent du passage ou non des TMD. Seule une étude de danger permet d'apprécier la possibilité d'accueillir les TMD, et dans l'affirmative de concevoir les dispositifs de sortie des usagers , et les équipements d'extraction.Dans le cas présent , les tunnels seront conçus et équipés en fonction de la décision qui sera prise.
Sigles	VSA : Voiries Structurantes d'Agglomération	TMD: Transport des Matières Dangereuses	Résilience: capacité d'adaptation en cas d'évènement (accidents importants)	
Fonctions Cadre de vie : Contribuer à l'amélioration de la qualité de vie		0	5	
Maîtriser les nuisances sonores en évitant l'exposition du maximum d'habitations ou d'activités	Traversée urbaine dense d'Arles	Emergence des tunnels en secteur urbain dense	Emergence des tunnels en zone d'habitat diffus	Vsfc: les sorties sont en Zones habitées dense à L'Ouest et périurbaine à l'Est (entre Fourchon et Hopital) Vsfl : les sorties sont hors en zones rurales à l'Ouest et proche de quelques constructions à l'Est
Réduire les nuisances de émissions de gaz en évitant l'exposition des espaces urbains	Traversée urbaine dense d'Arles	Emergence des tunnels en secteur urbain dense	Emergence des tunnels en zone d'habitat diffus	La solution de ventilation longitudinale permet de réduire les usines d'extraction aux extrémités plus en deux points intermédiaires
Trafics en traversée d'Arles (au pont d'Arles)	79 000V/j en 2028 en traversée d'Arles	30 000V/j en 2028 en traversée d'Arles	30 000V/j en 2028 en traversée d'Arles	
Effets sur le bâti et les acquisitions foncières	sans objet	Importantes démolitions de bâti en rive droite du Rhône	Limité	Vsfc: les sorties nécessitent la démolitions de construction au Sud RN113 à Vittier , et coupe la ville à Vittier et Fourchon Vsfl : les sorties sont hors en zones rurales à l'Ouest et proche de constructions à l'Est
Fonctions Développement: Contribuer au développement local et à la préservation du patrimoine				
Améliorer l'accèsibilité des pôles économiques locaux	Maintenue	Maintenue	Maintenue	
Améliorer les dessertes locales	Moyenne à bonne selon les quartiers	Moyenne à bonne selon les quartiers : RN113 délestée 4km	Moyenne à bonne selon les quartiers:RN113 délestée 6 km	Vsfc: suppression échangeur Arles centre , échangeur Fourchon réaménagé Vsfl : suppression échangeur Arles Centre , nouvel échangeur complexe Fourchon Pont de Crau en 2 parties avec Géométrie contraignante et en conséquence parcours des véhicules compliqué.
Faciliter les actions de développement d'Arles et Saint Martin de Crau	Peu facilitant:Coupure du secteur sauvegardé d'Arles , des espaces de projets	Légèrement facilitant:Atténuation de l'effet de coupure actuel	Facilitant:Atténuation de l'effet de coupure actuel	Vsfc : effet de coupure à Vittier et Fourchon (entre RN113 et Hôpital) Vsfl L'effet de coupure subsiste localement en zones rurales
Permettre un réaménagement en Boulevard Urbain de la RN113	Impossible	Permet le réaménagement partiel (4km)	Permet le réaménagement total (6km)	Vsfc: les emprises du tunnel sont contigue avec la RN113 entre Fourchon et le Pont sur le Rhône
Renforcer l'attractivité touristique et culturel du patrimoine du territoire	Protection importante du patrimoine et permet les projets touristiques(Fluvial,Nature,...)	Incompatible avec la protection du patrimoine (elle détruit une partie du cirque romain) et compromet certains projets touristiques (Port Fluvial/Cirque Romain)	Préserve totalement le patrimoine et permet les projets touristiques(Fluvial,Nature,...)	Vsfc : Vsfc : le mode de construction depuis la surface (parois moulées, terrassements , pose des caissons) détruit irrémédiablement une partie des vertiges du cirque romain Vsfl : le mode de construction en excavation classique souterraine ou tunnelier dans le substratum calcaire préserve les pieux bois du cirque Romain

Fonctions et Objectifs	RN113 (sans projet)	Vsf Courte	Vsf Longue	
0 Réhibitoire , 1 Très mauvaise, 2 Plutôt Mauvaise, 3 Plutôt Bonne, 4 Bonne, 5 très Bonne				
Commentaires relatifs aux Familles Sous Fluviales courtes et longues				
Fonctions Environnement: Préserver la relation entre le territoire et l'homme	5	3,5	4,5	
Préserver la résilience du territoire face aux Crues du Rhône	5	5	5	Les impacts sont limités aux trémies d'entrée et sortie de tunnel formant une partie "MURS/REMBLAIS" en zone inondable localement pour VSFC et hors Zone inondable pour VSFI. Les édifices sécurité d'évacuation des tunnels sont en Zone Inondables (cote au dessus crues)
Impact pour l'aléa de référence (Crue 1856 avec ruptures de digues)	Aucun impact	Aucun impact	Aucun impact	
Cohérence avec le fonctionnement hydraulique du territoire selon hypothèses du Plan Rhône	Neutre	Neutre	Neutre	
Impact sur la résilience du territoire en période de crues	Neutre	Opportunité d'amélioration	Opportunité d'amélioration	
Préserver le milieu physique: les eaux souterraines et superficielles	5	4	5	
Respecter les protections réglementaires(Eaux souterraines)	neutre	néant	néant	
Respecter la valeur réglementaire (Eaux souterraines)	neutre	Traversée de la Crau gérée par un contrat de nappe	Traversée de la Crau gérée par un contrat de nappe	
Respecter la valeur patrimoniale (Eaux souterraines)	Traversée de la nappe vulnérable de Crau (15km) Equipements actuels anciens	Traversée nappe vulnérable de Crau (15km) Equipements rénovés Entrave la nappe du Rhône	Traversée nappe vulnérable de Crau (15km) Rénovation des équipements actuels	VSFC : le mode de construction (parois moulées , radiers , pose des caissons) fait un obstacle pérenne à l'écoulement de la nappe superficielle du Rhône VSFI : le tunnel franchit le Rhône dans le substratum calcaire hors zone d'écoulement "active" de la nappe
Respecter la valeur réglementaire (Eaux superficielles)	neutre	Impacts temporaires sur le Rhône (classé 2ère cat.)	néant	
Respecter la valeur patrimoniale (1) (Eaux superficielles)	néant	néant	néant	
Respecter la valeur d'usage (Eaux superficielles)	Neutre	Interruption temporaire (travaux 2ans) canaux de Vigueirat, de la Vallée des Baux et d'Arles à Bouc	Aucun nouvel impact	VSFC : , interruption (3/5ans) en période de travaux de l'exploitation pour tout usage (y/c touristique et navigation du canal d'Arles à Bouc, interruption temporaire aussi des canaux de Vigueirat et de la Vallée des Baux (le tunnel franchit Vigueirat par dessous, la trémie EST franchit le Canal de La vallée des Baux par dessus (point délicat)
<i>(1) La préservation de la valeur patrimoniale des zones humides est traitée au paragraphe milieu naturel</i>				
Préserver les activités agricoles	5	4,5	4,5	
<i>Prélèvement total de surface agricole (estimation sommaire en ha +/-20%)</i>		70	80	La partie en tunnel des familles VSFC , n'impacte pas l'agriculture , ou très localement aux entrées Est et Ouest.L'impact de VSFI est localement fort sur les surfaces de Foin de Crau
Prélèvement sur les surfaces AOC,		Impact limité (<10ha)	Impact limité (<10ha)	L'impact de VSFI est localement fort sur les surfaces de Foin de Crau
Prélèvement sur les surfaces en Agriculture Biologique		Impact nul	Impact nul	
Préserver le milieu naturel face aux enjeux écologiques et de biodiversité	5,0	2,0	4,5	
Fonctionnement hydraulique des réseaux d'irrigation (corridors de biodiversité)	Impact nul	Impact nul	Impact nul	Impact limité à la phase de travaux
Le Rhône et ses abords	Impact nul	Impact Fort mais temporaire(travaux) au Franchissement du Rhône	Impact quasi nul	VSFC : le mode de construction (parois moulées , radier , pose des caissons) nécessite l'excavation du fond du lit du Rhône et du canal d'Arles à Bouc (au total sur 1,5km) et donc détruit le biotope . VSFI : le tunnel franchit le Rhône dans le substratum calcaire sous le lit et les rives du Rhône sans incidence sur la zone natura 2000.
Sur la rive gauche , Plaine du marais des Baux, Plaine de Bourg, Draille Marseillaise	Impact nul	Impact nul	Impact Natura 2000 acceptable	ne concerne pas les tunnels
La Crau: Crau Humide et Crau Sèche, Marais de Meyranne et des Chanoines	Impact nul	Impact positif (Restauration Corridors)	Impact positif (Restauration Corridors)	ne concerne pas les tunnels
Coût du projet (Meuros TTC)	-	1 330	1 590	Voir Evaluation au chapitre suivant
Maitriser les difficultés techniques de réalisation		Aléas fort liés au Tunnel sous le Rhône et classiques liés aux élargissements	Aléas fort liés au Tunnel sous le Rhône et classiques liés aux élargissements	L'expertise est réalisée comme l'étude CEREMA sur des données géologiques. La simulation globale de coût de l'ouvrage est faite avec la même méthode que l'étude CEREMA ; cette évaluation n'est pas basée sur une analyse fine des tâches et quantités à exécuter mais sur les résultats de chantiers de tunnels avec une prise en compte globale du contexte du projet.

3 - ACTUALISATION DES ESTIMATIONS

3.1 - Principes d'actualisation

L'étude des options de passage fait l'objet d'une actualisation dans le but de les comparer.

À ce titre, les estimations sont actualisées en ciblant les thématiques différenciantes ou sensibles, sans pour autant rechercher un approfondissement général des études techniques.

Une des thématiques majeures nécessitant une actualisation est l'actualisation des études de tunnel.

Le coût de l'opération est très sensible aux évolutions réglementaires. Ainsi, la prise en compte des contraintes réglementaires sur les tunnels, visant pour une majeure partie la sécurité des usagers, qui a fortement évolué depuis 2003 (aspects ventilation, évacuation, analyse des risques, résistance au feu des structures), nécessite une actualisation technique en plus de l'actualisation des principaux coûts.

3.1.1 - Métrés

Dans le cadre de l'actualisation, les métrés, hors section tunnel, sont ceux des études antérieures (voir le tableau des principales caractéristiques).

Ces métrés ont été complétés ou ajustés :

- En rajoutant un CEI et un CIGT qui n'ont a priori pas été valorisés dans les études antérieures et qui seront nécessaires pour permettre une consultation pour la concession ;
- En prenant en compte la nouvelle estimation des tunnels (issue de l'expertise).

3.1.2 - Prix unitaires

L'estimation tient compte des hypothèses suivantes:

- L'estimation des variantes Sud Vigueirat est basée sur une actualisation de l'étude de la solution retenue de 2012 du CETE Méditerranée, et donc sur des études de niveau détaillé et parfaitement adapté au contexte (les bilans ou bases de données d'autres études ou travaux posant toujours la question de la représentativité) ;
- Elle assure la cohérence de la décomposition des prix (les bilans de travaux dissociant rarement les éléments non ventilés, les échangeurs, les rétablissements routiers ou non routiers...);
- Elle permet une certaine cohérence avec les études en cours sur le fuseau Sud Vigueirat.

Les prix unitaires suivants sont appliqués :

- I. Maîtrise d'ouvrage, études et direction de travaux : 7% du montant total des travaux ;
- II. Acquisitions foncières et frais annexes : le calcul est une approche simplifiée (voir note spécifique sur les estimations ;.
- Travaux non ventilés :
 - Le prix unitaire proposé est établi en cohérence avec l'estimation de la comparaison des variantes Sud Vigueirat, hors mesures compensatoires environnementales et agricoles, qui constituent un risque à ce stade des études (couvert par les aléas) ;
- Sections courantes :
 - Pour les 4 typologies de section courante (2x2 voies neuves, 2x3 voies en ASP et 2x2 voies en ASP de RN ou d'A54), le prix unitaire de kilomètre de section courante est basé sur le prix de l'estimation de la comparaison des variantes Sud Vigueirat, ajusté afin que le montant total des travaux de section courante soit cohérent avec le montant chiffré en comparaison des variantes ;
 - Les autres prix ont été estimés (contre-allées, aménagement à 2x3 voies en traversée d'Arles)

- On notera que la stratégie proposée à ce stade en traversée d'Arles, est une limitation de l'impact foncier au moyen de mesures techniques de type soutènement, se traduisant par un coût d'acquisitions foncières limité mais un surcoût de travaux : cette stratégie pourra évoluer selon le déroulement des études ultérieures et des choix ultérieurs en matière de stratégie foncière.

■ Échanges et rétablissements routiers et non routiers :

- Comme pour les sections courantes, ces macro-prix sont établis en cohérence avec l'estimation de la comparaison des variantes Sud Vigueirat (à noter que les prix des échangeurs sont très variables et que les prix proposés permettent la cohérence du montant total des échanges, étant précisé que la typologie ou la géométrie des échangeurs n'est pas définie à ce stade des études);

- Pour la transparence hydraulique complémentaire, le montant total hors aléas spécifiques (en vue de la solution retenue) définis pour la comparaison des variantes a été ramené au kilomètre d'ouverture (103M€ pour 1,265 km d'ouverture soit 81,5 M€/km arrondi à 80 M€/km) ;

- Les aléas pour la transparence hydraulique, pris en compte dans l'estimation de la comparaison des variantes Sud Vigueirat en prévision de l'étude de la solution retenue (ouvertures complémentaires probables proposées dans les études hydrauliques de comparaison des variantes) sont intégrés sous la forme d'un pourcentage du montant des ouvertures hydraulique, défini en cohérence avec le montant retenu pour la VSVD de la comparaison des variantes sud Vigueirat (soit 40% du prix de la transparence) ;

■ Ouvrages d'art non courants :

- Le prix au kilomètre du viaduc sur le Rhône est établi sur la base du montant de la VSVD de la comparaison des variantes (141 M€ pour 1,685 km soit 84 M€/km) ;

- **Le prix des tunnels est établi avec la même méthode que l'étude CEREMA ; cette évaluation n'est pas basée sur une étude fine des tâches et des quantités à exécuter mais sur les résultats de chantiers de tunnels avec prise en compte du contexte global du contexte du projet.**

■ CEI / CIGT : le prix proposé de 2M€ TTC pour chacun des centres est basé sur des données d'opérations analogues ;

- Le montant du déclassement est celui provenant de l'étude de la solution retenue des études antérieures, montant déjà présenté par l'État lors des concertations précédentes.

3.2 - Estimations

A) Caractéristiques		VSFc	VSFI
		-	-
Longueur totale :	km	28.500	28.520
Aménagement			
En tracé neuf	km	4.600	7.120
- Dont 2x2 voies	km	4.600	7.120
- Dont contre-allées en traversée d'Arles	km	-	-
En Aménagement Sur Place	km	23.900	21.400
- Dont ASP 2x2 voies A54	km	3.500	3.500
- Dont ASP 2x3 voies RN	km	11.900	9.400
- dont périurbain	km	11.900	9.400
- dont traversée Arles	km	-	-
- Dont ASP 2x2 voies RN	km	8.500	8.500
Échanges routiers			
- 1/2 échangeurs	u	4	4
- Echangeurs complets	u	3	3
- Barrière de péage	u	-	-
Ouvrages d'art			
- Viaduc sur le Rhône	km	-	-
- Transparence hydraulique complémentaire	km	-	-
- Tunnel	km	-	-
- Ouvrage souterrain	km	2.563	5.343

B) Estimation (M€ TTC valeur 2020)		PU	Q	VSFc	VSFI
				-	-
I. Maitrise d'ouvrage, études et direction de travaux	%	7.00%		84.41	101.80
II. Acquisitions foncières et frais annexes (%prix)				8.03	6.99
II_A	AF travaux neuf	18%		4.58	4.00
II_B	AF travaux ASP	5.40%		3.45	3.00
III. Travaux				1 205.80	1 454.27
Travaux non ventilés		km projet	2.5 Cf. A)	71.25	71.30
1 Sections courantes (ouvrages d'art déduits)	km			89.33	77.70
1_A	2x2 voies neuve (hors OA)	km	12.5 Cf. A)	25.46	22.21
1_B	Contres allées	km	2 Cf. A)	-	-
1_C	ASP 2x2 voies A54	km	2 Cf. A)	7.00	7.00
1_D	ASP 2x3 voies RN (contexte périurbain)	km	3.35 Cf. A)	39.87	31.49
1_E	ASP 2x3 voies RN (traversée d'Arles)	km	5.5 Cf. A)	-	-
1_G	ASP 2x2 voies RN	km	2 Cf. A)	17.00	17.00
2 Échanges routiers				54.00	54.00
2_1	1/2 échangeur	u	6 Cf. A)	24.00	24.00
2_2	Echangeur complet	u	10 Cf. A)	30.00	30.00
3 Rétablissements routiers	km projet	1.5	Cf. A)	42.75	42.78
4 Rétablissements non routiers				24.23	24.24
4.A	Rétablissements courants	km projet	0.85 Cf. A)	24.23	24.24
4.B	Transparence hydraulique complémentaire	km	80 Cf. A)	-	-
4.C	Transparence hydraulique aléas (études ultérieur	%	40% /	-	-
6 Ouvrages d'art				900.00	1 160.00
6.A	Viaducs neufs	km	117 Cf. A)	-	-
6.A	Viaducs ASP	fft	1 /	-	-
6.C	Tunnel option V4	km	153.9 Cf. A)	-	-
6.D	Tunnel (sans TMD)	Ft	Expertise tunnel	900.00	1 160.00
8 Aires annexe (aire de repos ou de service)	u	10	2	20.00	20.00
9 CEI et CIGT				4.00	4.00
9.A	CEI + CIGT	u	2 2	4.00	4.00
9.B	BPV	u	10 Cf. A)	-	-
10 Frais liés au déclassement	fft	0.25	1	0.25	0.25
Total hors aléas phases amont				1 298.24	1 563.07
Aléas phase amont (% travaux hors tunnels et aléas		%	10%	30.58	29.43
TOTAL avec aléas				1 328.82	1 592.50

3.3 - Comparaison avec les études antérieures

Le montant des études antérieures est rappelé ci-dessous (études / AF / travaux), avec l'actualisation à janvier 2020 avec l'indice TP01.

Le raisonnement par actualisation des prix unitaires des études de 2003 montre des ordres de grandeurs similaires aux nouvelles estimations.

Analyse / études antérieures	VSFc	VSFI
	-	-
Etudes antérieures (CETE Méditerranée, avril 2003) - valeur 2002		
Etudes et reconnaissances géologiques	28	95
Acquisitions foncières	9	4
Travaux	615	858
SAV 15%	98	143
Complément ASP		45
Total TTC (€2002)	750	1 145
Etudes antérieures (CETE Méditerranée, avril 2003) - valeur 01/2020 (TP01)		
Etudes et reconnaissances géologiques	43.6	147.8
Acquisitions foncières	14.0	6.2
Travaux	956.8	1 334.8
SAV 15%	152.5	222.5
Complément ASP	0.0	70.0
Total TTC (€2020)	1 167	1 781
Rajout des compléments de transparence hydraulique		
Surcout transparence hydraulique	0.0	0.0
Total TTC avec transparence hydraulique (€2020)	1 167	1 781

4 - ANNEXES

4.1 - Annexe 1 : Expertise des tunnels sous fluviaux du Rhône (14 mai 2020)

CONTOURNEMENT AUTOROUTIER D'ARLES

Note d'expertise concernant les variantes de traversée sous-fluviale du Rhône

Annecy le 14 mai 2020

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	3
OBJECTIFS DE LA PRÉSENTE NOTE D'EXPERTISE.....	3
COMMENTAIRES GÉNÉRAUX.....	3
ANALYSE ET COMMENTAIRES.....	4
4.1 Trafic – Profil en travers – Géométrie.....	4
4.1.1 Trafic.....	4
4.1.2 Profil en travers.....	5
4.1.3 Géométrie.....	6
4.2 Géologie – Géomécanique.....	6
4.3 Contexte réglementaire.....	6
4.4 Ventilation – Sécurité – Évacuation.....	7
4.4.1 Ventilation.....	7
4.4.2 Sécurité.....	7
4.4.3 Évacuation.....	7
4.4.4 Synthèse.....	8
4.5 Résistance au feu des structures.....	9
4.6 Génie civil – Méthodes de construction.....	9
4.6.1 Variante 1.....	9
4.6.2 Variante 2.....	10
4.6.3 Variante 3.....	11
4.6.4 Variante 4.....	12
4.7 Délais de construction.....	12
4.8 Coûts de construction et d'exploitation.....	12
5. SYNTHÈSE.....	13
6. ANNEXE.....	15
6.1 Principales caractéristiques géométriques de la variante V5.....	15
6.1.1 Concept.....	15
6.1.2 Profil en long.....	15
6.1.3 Profils en travers type.....	16
6.2 Concept de ventilation.....	17
6.2.1 Conditions normales de circulation.....	17
6.2.2 Ventilation de désenfumage en cas d'incendie.....	17
6.3 Concept d'évacuation et de sécurité.....	17
6.4 Exploitation et sécurité.....	18
6.5 Transports de matières dangereuses (TMD).....	18
6.6 Coûts de construction.....	19

ILLUSTRATIONS

Figure 1 - trafic prévisionnel TMJA pour la variante sous-fluviale.....	3
Figure 2 - trafic prévisionnel "heure de pointe" pour variante sous-fluviale.....	4
Figure 3 - délais de construction mentionnés dans le mémoire de synthèse.....	11
Figure 4 - estimation des coûts de construction définis dans le mémoire de synthèse de 2003.....	12
Figure 5 - commentaires synthétiques - évaluation des coûts des travaux de construction.....	13
Figure 6 - profil en long schématique.....	14
Figure 7 - profil en travers type tranchée couverte.....	15
Figure 8 - raccordement tranchée couverte / tunnel foré.....	15
Figure 9 - profil en travers type - section au tunnelier.....	15
Figure 10 – ventilation en conditions normales de circulation.....	16
Figure 11- ventilation en cas d'incendie.....	16
Figure 12 - tableau sommaire d'évaluation des coûts de construction.....	18

1. INTRODUCTION

Le projet de contournement autoroutier d'Arles consiste à aménager un itinéraire de 26 km, dont 13 km en tracé neuf à 2x2 voies et 13 km de réaménagement sur place de la RN 113 à l'est d'Arles. Il assurera le dernier maillon de la continuité autoroutière entre l'Espagne, la France et l'Italie. Il doit permettre ainsi de libérer la ville d'Arles du trafic de transit (de l'ordre de 45%) qui la traverse actuellement via la RN113.

En 2003, le CEREMA a réalisé les études préliminaires d'une variante consistant à un aménagement quasi sur place de la RN113 au droit d'Arles avec une traversée sous fluviale du Rhône.

En 2018, la Direction des routes a demandé de reprendre les études préalables selon une option de passage au sud d'Arles (appelée Fuseau Sud Vigueirat). Cette reprise d'études ne comporte pas de mise à jour des études de la variante sous-fluviale de 2003.

Depuis 2003, le contexte réglementaire a évolué de façon très importante pour le domaine de la sécurité des tunnels routiers. Les technologies de construction ont également fait de grands progrès, et les dispositions relatives à la prise en compte de la pérennité des structures en cas d'incendie deviennent une préoccupation majeure associée aux objectifs plus contraignants en matière de sécurité en exploitation.

2. OBJECTIFS DE LA PRÉSENTE NOTE D'EXPERTISE

La présente note d'expertise a pour objet :

- de faire le point sur les évolutions réglementaires et technologiques, de conception, de construction et d'exploitation,
- d'évaluer l'adéquation du projet de 2003 par rapport aux conditions d'aujourd'hui, de définir les mises à jour indispensables et d'essayer dans la mesure du possible d'en évaluer les écarts et les conséquences.

Cette note ne constitue pas une mise à jour des études préliminaires de 2003. Ce n'était pas l'objet de la demande, et le contexte ne l'aurait de toutes les façons pas permis.

Compte tenu des délais très courts impartis et de l'impossibilité de prendre connaissance de tous les documents existants, cette note d'expertise ne relève que les aspects majeurs ou stratégiques, et doit être considérée comme préliminaire. Un certain nombre d'avis ou de commentaires relèvent de l'expérience, et non pas des résultats de calculs.

Les documents consultés pour la rédaction de ce document sont les suivants :

- mémoire de synthèse des études préliminaires de 2003 d'une traversée sous fluviale,
- plans et profils en long des variantes V1 (caissons immergés), V2 (tunnel foré long) et V3 (tunnel court excavé dans les alluvions). Les documents de la variante V4 (tunnelier pressurisé) n'ont pas été communiqués,
- rapport géologique et géotechnique générale de mai 2003 (réf. BB/LJB I03-110),
- note provisoire du CEREMA relative au trafic – Analyse des résultats des modélisations de trafic du contournement autoroutier d'Arles 2019-2020 - Note trafic V6 - Document de travail du 09/01/2020.

3. COMMENTAIRES GÉNÉRAUX

Les études de 2003 appellent de nombreux commentaires. Ces commentaires, synthétisés dans le présent chapitre seront repris pour la plupart de façon plus détaillée dans les chapitres suivants.

Les études sont « datées » et ne correspondent plus à la situation actuelle notamment sur les points suivants :

- la comparaison des images par satellite de Google Earth avec les tracés des alternatives de 2003 montre une évolution importante de l'urbanisation en rive droite du Rhône. Les « trouées initiales » utilisées par les tracés de 2003 sont en grande partie construites. La maîtrise des emprises sera rendue plus complexe et plus coûteuse avec la démolition de nombreuses constructions récentes. En rive gauche du Rhône, la situation n'a pas beaucoup évolué,
- le contexte réglementaire a évolué de façon très importante depuis 2003, notamment pour tout ce qui concerne la sécurité. Ces évolutions ont une incidence très importante sur le projet, notamment en termes de concept et de coût de construction,
- la prise en compte du passage en tunnel des véhicules transportant des matières dangereuses (TMD) a beaucoup évolué, tant du point de vue réglementaire, que du point de vue de leur impact sur la sécurité, et sur leur prise en compte dans la protection des structures,
- les concepts relatifs à la ventilation ont également évolué de façon importante, notamment en lien avec la sécurité, les conditions d'évacuation des usagers, ainsi que les modes d'intervention des services de secours,
- les technologies ont beaucoup évolué, permettant la mise en œuvre de solutions un peu hésitantes en 2003 (tunnelier de grand diamètre par exemple),

4. ANALYSE ET COMMENTAIRES

4.1 Trafic – Profil en travers – Géométrie

4.1.1 Trafic

Les projections de trafic du mémoire de mars 2003 sont basées sur des données de 2000. Ce mémoire comporte de plus une confusion entre les éléments du tableau (données mentionnées comme des uvp), et reprises ensuite en v/j.

L'analyse ci-dessous relative au trafic, et par-delà même au dimensionnement du nombre de voies, prend en compte les éléments du document de travail du CEREMA du 09/01/2020. Les projections 2028 de la variante sous-fluviale courte ont été considérées. Elles ont été complétées par les projections aux horizons 2043, 2048 et 2058 en considérant des taux de croissance identiques à ceux des autres alternatives et sont récapitulées au tableau ci-dessous.

VSF courte	TMJA	VL	PL
2028	44 288	37 020	7 268
2043	50 945	43 112	7 833
2048	52 917	44 920	7 998
2058	56 874	48 768	8 106

Figure 1 - trafic prévisionnel TMJA pour la variante sous-fluviale

En considérant une répartition 40% / 60% pour le sens le plus chargé, un coefficient de 10 entre TMJA et heure de pointe de trafic, les projections de trafic horaire en heure de pointe sont les suivantes.

années	VL	PL	uvp PL	total uvp
2028	2 221	436	1 308	2 657
2043	2 587	470	1 410	3 057
2048	2 695	480	1 440	3 175
2058	2 926	486	1 459	3 412

Figure 2 - trafic prévisionnel "heure de pointe" pour variante sous-fluviale

Le trafic PL nécessite une grande partie de la capacité de la voie de droite. Une seule voie est insuffisante pour assurer la capacité des VL.

En théorie deux voies sont suffisantes par sens pour assurer la totalité du trafic en heure de pointe, les VL pouvant compléter le reliquat de capacité de la voie de droite. Cette disposition conduit toutefois à des dispositions dangereuses :

- ▶ la rampe de sortie du tunnel concerne le dernier tiers du tunnel. Sur les deux premiers tiers du tunnel, la voie de droite peut être partagée par les PL et les VL en fonction des besoins. En approche de la rampe, les VL auront tendance à se dégager de la voie de droite pour ne pas subir les ralentissements occasionnés par les PL avec comme conséquences :
 - un déboîtement des VL pour rejoindre la voie rapide, avec le cas échéant une tendance à forcer le passage,
 - une saturation de la voie rapide qui ne peut pas absorber tout le flux de VL,
 - des ralentissements brutaux du trafic sur la voie rapide,
 - des créations de bouchons.
- ▶ ces situations interviendront dans le tunnel, de façon assez récurrente. Leur balisage est difficile, notamment celui de la queue de bouchon. Elles surviennent sur un itinéraire autoroutier de transit et créent des situations dangereuses, sources d'accidents. De telles dispositions doivent être évitées en tunnel, car les accidents peuvent s'aggraver rapidement. Leur gestion et les conditions d'intervention des secours y sont plus complexes en particulier si les accidents sont accompagnés d'incendie.

Un profil en travers à deux voies ne permet pas d'assurer les conditions de sécurité requises compte tenu des conditions particulières liées à sous-fluviale et au volume du trafic. Il est indispensable que le profil en travers comporte trois voies dès la mise en service du tunnel :

- ▶ une voie de droite réservée aux PL. Cette voie doit être introduite en amont du tunnel (surtout en cas d'une première étape de 2x2 voies à l'air libre) pour éviter toute modification en tunnel des caractéristiques transversales, de l'occupation des voies et de comportement des conducteurs associés à ces modifications. Toute modification de cette nature en tunnel est source de risque accru. Cette voie doit être supprimée en aval du tunnel à une distance permettant d'éviter tout impact à l'intérieur du tunnel,
- ▶ deux voies pour les VL.

Cette disposition permet d'éliminer une source importante de risque et d'accident tout en assurant une meilleure capacité à l'intérieur du tunnel. Elle pourrait permettre d'augmenter la déclivité des pentes et rampes d'accès aux alentours de 4%, notamment pour bénéficier de meilleures conditions géomécaniques pour les alternatives de tunnel foré, ou pour réduire la longueur des tranchées couvertes (voir chapitre 4.6.2). Il conviendrait alors :

- ▶ de dédier la voie de droite aux PL, de leur interdire le dépassement, et de mettre en place un contrôle et des pénalisations,
- ▶ et, en cas de fort trafic, de limiter la vitesse des voies VL à 90 km/h (au lieu de 110 km/h) pour éviter des distorsions importantes de vitesses avec les PL.

4.1.2 Profil en travers

Pour les motifs exposés au § 4.1.1 ci-dessus un profil à 2x2 voies ne peut pas être retenu pour la section souterraine.

Le profil en travers doit comporter 2x3 voies pour la section souterraine, et ce, dès sa mise en service.

Bien que le tracé de la sous-fluviale soit géographiquement situé en secteur urbain ou périurbain, il ne s'agit pas d'une autoroute urbaine :

- ▶ la circulation est essentiellement une circulation de transit avec une proportion importante de trafic à caractère international,
- ▶ la configuration du site et notamment la position des échangeurs et le maintien de la RN 113 (même après sa requalification en boulevard), font que la sous-fluviale est très peu concernée par un trafic de type urbain.

Toutes les voies doivent présenter une largeur roulable de 3,50 m, portant ainsi la largeur roulable à 11,50 m entre bordures de trottoirs avec des BDG et BDD de 0,50 m.

La largeur de trottoir doit tenir compte non seulement du gabarit de passage des piétons, mais aussi des équipements fixés aux piédroits et de leur périmètre de protection de 0,20 m, ainsi que de la géométrie du piédroit (plan ou incurvé en fonction de la méthode de construction). En première approche la largeur de trottoir au niveau du sol est de 0,90 m / 0,95 m pour un tunnel foré et de 1,05 m / 1,10 m pour une section en caisson ou en tranchée couverte.

4.1.3 Géométrie

Le calage en profil en long doit être mieux adapté au contexte géologique, ainsi qu'aux méthodes de construction, aux risques et aléas.

Les ouvrages pourraient être également optimisés en tenant compte de l'observation faite ci-dessus concernant la déclivité des pentes et des rampes. La limite de 3% associée à l'obligation ou non d'une VSVL est caduque à 2x3 voies compte tenu des contraintes en termes de capacité et de sécurité, qui conduisent à réserver une voie PL sur

toute la longueur de l'ouvrage. La déclivité peut être portée à 4% (voir 4,5%), sans mettre en cause la capacité de l'ouvrage vis-à-vis du trafic. Cela conduit à renforcer la puissance des installations de ventilation.

La hauteur libre a été définie à 4,75 m. Elle est souvent réduite à 4,50 m en tunnel.

4.2 Géologie – Géomécanique

Les informations disponibles concernant la géologie et la géomécanique sont assez sommaires et d'ordre plutôt régional. La coupe géologique figurant dans le rapport n'est pas lisible (rectangle noir). Il y a peu d'éléments dans les dossiers consultés permettant d'évaluer les incertitudes relatives notamment à la position du toit de la formation de calcaires et calcaires marneux. Il ne semble pas qu'une étude même très préliminaire et quelques sondages de reconnaissance aient été réalisés pour cette variante de sous-fluviale.

Certaines coupes du dossier géologie géotechnique de mai 2003 font apparaître des variations très sensibles du toit de la formation rocheuse entre -25 m et -30 m, et des formations assez conséquentes de limon, qui ne sont pas reflétées sur les profils en long des différentes alternatives.

Les informations concernant les caractéristiques mécaniques des matériaux sont limitées et très générales. Du point de vue géomécanique il est mentionné que les matériaux rocheux sont marqués par des discontinuités (diaclasses et failles éventuelles). Ils se présentent en bancs bien lités, mais aucune information n'est donnée sur l'épaisseur de ces bancs ni sur leur compacité. Il semble qu'il n'y ait eu aucun carottage, et aucune valeur n'est donnée concernant l'épaisseur des bancs, les fracturations, les RQD, etc.

Les informations géologiques et géomécaniques disponibles à l'heure actuelle laissent apparaître de nombreuses incertitudes. Elles sont à considérer avec d'autant plus de vigilance que certaines alternatives sont très interdépendantes des conditions géomécaniques, du positionnement du toit des calcaires (calage altimétrique, choix d'un mode de construction, évaluation des risques de construction, dimensionnement et estimations des ouvrages, etc.).

4.3 Contexte réglementaire

Les bases réglementaires ont évolué de façon fondamentale depuis la rédaction du mémoire de mars 2003. En particulier la circulaire du 25 août 2000 qui définissait notamment les dispositions relatives à la sécurité n'a plus cours.

Le projet doit désormais satisfaire à de nouveaux documents réglementaires plus exigeants, et notamment (liste non exhaustive):

- ▶ Directive 2004/54/CE du Parlement Européen et du Conseil en date 29 avril 2004 concernant les exigences de sécurité minimales applicables aux tunnels du réseau routier transeuropéen. Outre les exigences minimales qu'elle impose, cette directive rend obligatoire dès le niveau le plus amont la réalisation d'études de risques et de dangers, qui seules sont de nature à définir les exigences et conditions de sécurité propres et adaptées à chaque ouvrage en fonction de ses nombreuses particularités. La Directive fait également obligation de soumettre les dispositions de sécurité à un organisme national spécifique (la CNESOR en France),
- ▶ circulaires interministérielles et arrêtés ministériels (en 2006, 2007 et version consolidée en 2012),
- ▶ lois et décrets ou instructions techniques (en 2002, 2005, 2006 et 2012),
- ▶ réglementation française et européenne concernant les transports de matières dangereuses dans les tunnels. Obligation d'une étude EQR (évaluation quantitative des risques) avec les différents itinéraires alternatifs au passage en tunnel.

Les dossiers pilotes et notes techniques du CETu sont des documents importants à prendre en compte. Ils ont fait l'objet de nombreuses mises à jour ou publications nouvelles depuis 2003.

Les recommandations de l'AIPCR (Association Mondiale de la Route) constituent des éléments de référence importants. Il convient en particulier de souligner un document de référence essentiel relatif aux incendies : « Caractéristiques des incendies de dimensionnement en tunnels routiers ».

Les différentes alternatives esquissées dans les études préliminaires de 2003 ne satisfont pas à ces nouvelles réglementations et de nombreuses modifications doivent être apportées en matière de sécurité. Elles ont une incidence sur la conception générale et sur les coûts de construction.

La présente note technique souligne ci-après quelques impacts majeurs. Elle n'a pas pour objet de recenser tous les impacts et leurs conséquences. Cela nécessiterait une reprise complète des études préliminaires tenant compte de ces nouvelles exigences.

4.4 Ventilation – Sécurité – Évacuation

Les problématiques ventilation, sécurité et évacuation forment un tout lors d'un incendie et ne peuvent pas être dissociées.

4.4.1 Ventilation

Le mémoire d'études préliminaires ne comporte aucune préanalyse ou prédimensionnement préliminaires des installations de ventilation. Il est uniquement fait référence à des dispositions bibliographiques.

Compte tenu de la longueur de l'ouvrage, une installation de ventilation longitudinale sur la totalité de la longueur du tunnel devrait être acceptable pour les conditions normales d'exploitation, sous réserve bien évidemment d'une vérification de prédimensionnement. La ventilation longitudinale risque toutefois d'être un peu limitée pour les solutions longues compte tenu du trafic PL et des déclivités. La nécessité d'un éventuel rejet intermédiaire doit être analysée en tenant compte également des conditions de rejet et de dispersion de la pollution, ainsi que des impacts sur la qualité de l'air.

Les dispositions préconisées en cas d'incendie, consistant à une extraction massive des fumées par des puits espacés de 800 m (hors TMD) et 400 m (avec TMD), sont inadaptées, plus particulièrement dans les sections rectangulaires à faible hauteur sous plafond. Il est en effet quasiment impossible de maintenir les fumées stratifiées en plafond pendant toute la période d'auto-évacuation des usagers surtout avec un espacement de 400 m entre issues de secours comme il est préconisé dans le mémoire.

Une préanalyse concomitante « ventilation – sécurité - évacuation » est indispensable.

4.4.2 Sécurité

Une préanalyse spécifique des risques est désormais indispensable dès ce niveau d'études préliminaires. Elle permet entre autres de déterminer les dispositions d'évacuation et leurs espacements en fonction des caractéristiques propres à chacune des solutions et notamment : géométrie de la section – ventilation de désenfumage – risques de bouchon – espaces de mise hors danger – le cas échéant faisabilité des circuits d'évacuation en fonction des conditions géomécaniques et des modes de construction – etc.

Les préconisations du mémoire sont essentiellement bibliographiques et sont à modifier de façon importante.

4.4.3 Évacuation

Les dispositions relatives à l'évacuation des usagers vers des espaces sécurisés en cas d'incendie doivent résulter d'une analyse globale « ventilation – sécurité - évacuation » pour tenir compte des particularismes du projet.

Les dispositions esquissées dans les études de 2003 sont essentiellement bibliographiques et d'ordre général. Elles consistent pour l'essentiel à des connexions aménagées entre les deux espaces de circulation avec des espacements de 400 m, ou de 200 m en cas de TMD. Dans le cas d'un tunnel foré, la galerie reliant les deux tubes permet d'organiser un sas et un espace tampon permettant de différer de quelques minutes l'accès des usagers vers le tube sain en circulation jusqu'à ce que des dispositions soient prises vis-à-vis du trafic pour assurer leur sécurité. Dans le cas des tronçons de tunnel en tranchée couverte, un simple sas de 15 m² sépare les deux espaces de circulation. Il ne permet pas d'assurer un espace tampon temporaire. Le flux des usagers en fuite est de plus limité et l'évacuation est assurée au début de l'incendie vers un tube encore sous circulation, dans des conditions de sécurité réduites.

Toutes ces dispositions sont à reprendre et à renforcer à la suite d'une étude de danger et d'une analyse globale « ventilation – sécurité - évacuation ».

Pour un tunnel construit en tranchée couverte et/ou en caissons préfabriqués, la prise en compte des nouvelles exigences en termes de sécurité conduirait vraisemblablement :

- ▶ à intégrer un corridor d'évacuation situé entre les deux espaces de circulation parallèlement à ceux-ci. La largeur du corridor serait de 3 à 4 m. Il serait surmonté pour les tunnels longs (ditto pour les tunnels courts en cas de TMD) d'une gaine d'extraction des fumées. Selon la longueur du tunnel et les disponibilités en surface, aménagement éventuel d'une issue intermédiaire en direction de la surface,
- ▶ à aménager des issues de secours selon un espacement de l'ordre de 100 m entre les espaces de circulation et le corridor (similitude avec un projet actuel sous-fluvial à l'international à 2x3 voies, fort trafic PL, sans TMD),

Pour les sections en tunnel foré les dispositions dépendent du mode de construction (conventionnel ou tunnelier), de la forme de la section (possibilité d'une galerie d'évacuation sous chaussée pour une excavation au tunnelier), de la longueur du tunnel et des dispositions relatives à la ventilation incendie. Les espacements entre les galeries de connexion ou les issues de secours vers le corridor sous chaussée ne peuvent être déterminés qu'après l'analyse globale « ventilation – sécurité - évacuation ».

Dans le cas d'un tunnel comportant des tronçons forés et des tronçons en tranchée couverte, les dispositions d'évacuation seraient une combinaison de celles mentionnées ci-dessus, avec des ouvrages d'interfaces et vraisemblablement une connexion à l'air libre dans les points d'interface entre les deux modes de construction.

4.4.4 Synthèse

Les dispositions relatives à la ventilation incendie, à la sécurité des personnes, à leur évacuation, de même que les dispositions relatives à la résistance des structures au feu doivent prendre en compte trois objectifs et étapes successives. Chaque étape correspond à des caractéristiques d'incendie de dimensionnement en fonction de la nature du trafic :

- ▶ étape d'auto-évacuation des usagers depuis l'espace où se situe l'incendie vers un espace sécurisé : l'extérieur, les galeries d'évacuation, le tube sain (une évacuation vers un refuge ne comportant pas d'accès pompier vers l'extérieur est interdite). Les conditions à assurer concernent la visibilité et un niveau de température permettant aux personnes de rejoindre sans difficulté majeure les issues de secours vers les espaces sécurisés. Le délai est de lors du quart d'heure,
- ▶ étape d'intervention des pompiers d'une part pour lutter contre l'incendie et d'autre part pour prendre en charge les usagers des espaces sécurisés. Les conditions à assurer concernent la visibilité et le niveau de température qui peuvent être plus élevés compte tenu de l'équipement des pompiers. Les conditions concernent également la stabilité des structures,
- ▶ la dernière étape concerne l'intégrité des installations et des structures. Cette étape dépend de la nature de l'ouvrage, de la géologie, des risques d'effondrement et de leurs conséquences. Lors de cette étape, et selon le niveau de risques, le tunnel est libre de tout intervenant.

Les dispositions des études de 2003 relatives à la ventilation, à la sécurité et à l'évacuation des usagers ne correspondent plus du tout aux exigences actuelles. Elles doivent être reprises intégralement. Les nouvelles dispositions à mettre en œuvre ont une incidence importante sur l'ensemble des ouvrages de génie civil, ainsi que sur les équipements de sécurité et d'exploitation. Elles s'accompagneront de coûts plus importants d'investissement.

4.5 Résistance au feu des structures

Deux types de structures sont à considérer : les structures internes comme les gaines de ventilation en plafond et les structures externes comme la structure périmétrique du tunnel soutenant l'excavation.

Les risques et conséquences concernant les structures externes dépendent de la puissance de l'incendie et de la nature des terrains dans lesquels le tunnel est construit :

- ▶ dans le cas d'un tunnel dans un massif rocheux, un incendie peut occasionner des dommages importants à la structure du tunnel, nécessitant sa fermeture temporaire, mais la probabilité est faible d'un effondrement localisé de l'ouvrage,
- ▶ dans le cas d'un tunnel situé en terrain meuble, dans les sols et sous le niveau de la nappe phréatique, un incendie peut occasionner des dommages à la structure qui peuvent être irréversibles et entraîner la perte de l'ouvrage.

Le mémoire de 2003 mentionne un objectif de résistance au feu de la structure HCM 120 pour les parties d'ouvrage sous l'eau dans les sables et graviers. Il n'est pas précisé si cet objectif prend en compte les TMD.

Des simulations détaillées récentes faites sur un ouvrage sous-fluvial similaire à 2x3 voies, interdit aux TMD et comportant un trafic PL de même magnitude, montrent que l'incendie se propage de PL à PL, notamment par radiation, et que l'objectif de résistance au feu à prendre en compte est HCM 180. Les simulations ont été faites pour une puissance d'incendie unitaire de 100 MW par PL. Cet objectif ne peut être atteint uniquement par l'emploi de bétons résistants au feu. Il est indispensable de mettre en œuvre des protections passives rapportées sur tout l'intrados (piédroits, plafonds ou voûtes) des espaces de circulation. Ces protections passives (panneaux ou produit giclé) sont d'un usage courant notamment lors des travaux de requalification des ouvrages existants situés en terrain meuble, ou pour la protection des structures internes.

Un incendie de TMD met en œuvre des puissances unitaires par véhicule beaucoup plus importantes et des durées d'incendie beaucoup plus longues. L'objectif de protection de la structure est beaucoup plus élevé, de même que celui des protections passives qui demeurent toutefois souvent insuffisantes. Il est alors nécessaire d'installer un système fixe de lutte contre l'incendie. Cette nature d'installation n'est pas destinée à éteindre l'incendie. Elle a essentiellement pour objectif de réduire de façon importante le niveau de température permettant de réduire la température à laquelle les structures sont exposées. Elle permet également aux pompiers de se rapprocher un peu plus de l'incendie. De telles installations sont mal adaptées aux régions exposées à des conditions climatiques rigoureuses (ce qui n'est pas le cas d'Arles). Elles nécessitent beaucoup de maintenance et sont coûteuses en investissement comme en entretien et maintenance.

4.6 Génie civil – Méthodes de construction

Les dispositions de génie civil décrites au dossier des études préliminaires sont assez succinctes. Elles sont synthétisées sur les profils en long des variantes 1, 2 et 3. Le profil en long de la variante 4 n'a pas été transmis, ce qui conduit à faire des supputations relatives aux dispositions générales de cette variante.

L'urbanisation a évolué de façon importante en rive droite. De nombreuses constructions ont été réalisées dans l'emprise du tracé et toutes les variantes nécessitent des démolitions dont l'amplitude peut être plus ou moins importante.

4.6.1 Variante 1

La variante 1 se caractérise par un ouvrage à faible profondeur avec un franchissement du Rhône avec des caissons préfabriqués immergés. Les accès de part et d'autre du Rhône sont réalisés à l'air libre en tranchée couverte entre des parois moulées de grande profondeur.

L'ouvrage est situé en totalité dans les alluvions du Rhône et sous le niveau de la nappe phréatique.

Quelques points essentiels ayant un impact sur l'évaluation, voir la faisabilité, de cette variante n'ont pas été abordés et notamment :

- aucune information sur les contraintes de navigation sur le Rhône ni sur l'intensité du courant dans les périodes d'étiage du Rhône. Ces deux aspects sont importants pour les travaux en rivière : dragage – pente des talus de la souille – risque de remblaiement par des sables ou les limons – emprise possible du chantier en rivière – difficultés éventuelles de mise en œuvre.
- informations concernant la pollution des matériaux du fond du lit du Rhône et du canal d'Arles à Boulc – nécessité de traitement ou non – lieux potentiels de dépôts et accessibilité – mode de transport (a priori navigation).
- condamnation temporaire du canal d'Arles à Boulc.
- la darse de construction des caissons a des dimensions réduites (limitation à deux caissons en construction simultanée). D'autres emplacements jointifs du Rhône sont-ils envisageables ?

Diverses méthodes constructives sont envisagées pour la réalisation des tranchées d'accès. Le remblaiement temporaire du canal de navigation en rive gauche pose question. Les parois moulées doivent être indépendantes de la structure renfermant les voies de circulation pour garantir l'étanchéité de l'ouvrage.

La largeur du caisson doit être augmentée conformément aux observations faites ci-dessus (largeur roulable – galerie d'évacuation). À la suite d'un examen préliminaire par Google Earth, il est possible de disposer d'une emprise d'une cinquantaine de mètres en maintenant la desserte de riverains par la rue Jean Charcot. Le pont du CD 35 devrait être vraisemblablement déconstruit puis rétabli.

Pour les travaux situés dans l'emprise du canal d'Arles à Boulc, et compte tenu de l'évolution du matériel et de son encombrement, les parois moulées pourraient être réalisées en partie depuis une barge et en partie depuis une plateforme prenant appui sur une barge et sur la berge. Les boutons entre parois posent question pour la réalisation des déblais sous l'eau et leur évacuation compte tenu de la grande perméabilité des alluvions à proximité du lit du Rhône. Il est vraisemblable que les études de stabilité des parois conduisent à envisager des ancrages ou une contre-paroi, ainsi qu'une géométrie des parois avec des raidisseurs. Toutes ces dispositions ne pourront être définies qu'après des reconnaissances approfondies et des essais de laboratoire.

Au vu des éléments disponibles, le niveau du canal d'Arles à Boulc semble être situé au niveau des eaux normales du Rhône. L'examen du profil en long montre qu'entre le P 22+50m et le profil P 43, il pourrait être envisagé de réaliser la structure souterraine située entre les parois moulées par un mode de construction en caissons immergés. Ce mode de construction est plus rapide, moins prégnant sur le site lors de la réalisation des travaux. Il permet de plus d'alléger les parois moulées, la fouille demeurant entièrement en eau. Cette solution devrait certainement être plus économique. Deux modes de réalisation sont envisageables :

- les caissons immergés sont préfabriqués dans la même darse que ceux de la traversée sous le Rhône. Ceci nécessite, pour les travaux en rive gauche, que l'interface hydraulique entre le Rhône et le canal puisse être gérée en dehors des périodes des eaux normales du Rhône.
- dans le cas contraire, les dispositions présentées ci-dessous au paragraphe 4.6.2 peuvent être mises en œuvre en rive gauche, comme en rive droite.

Tous les ouvrages de génie civil intermédiaires de la variante V1 (puits des extractions massives – évacuation) peuvent être supprimés.

4.6.2 Variante 2

La variante 2 se caractérise par un tunnel foré de 3,4 km environ au passage sous le Rhône, sous le canal d'Arles à Boulc et sur large part des accès. Les rampes sont réalisées à l'air libre en tranchée couverte entre des parois moulées pouvant atteindre une quarantaine de mètres de profondeur. Le profil en long est calé de façon à inscrire la majorité du tunnel soit dans les formations calcaires, soit en rive droite dans les cailloutis cimentés. Les deux extrémités du tunnel sont situées en zones mixtes de transition : calcaires / alluvions en rive gauche et cailloutis cimentés / alluvions en rive droite. Ces zones de transition ont une longueur de 300 m à 400 m.

À noter que la section du tunnel en rive droite évite la destruction de bâtiments sur environ 800 à 900 m, par rapport à la variante 1. Les secteurs d'urbanisation récente (logements pavillonnaires et activités industrielles) sont toutefois impliqués sur 600 à 700 m par le tronçon en tranchée couverte. En rive gauche le tunnel foré permet d'éviter toute atteinte au secteur du cirque romain, au canal d'Arles à Boulc, à d'autres canaux, ainsi qu'à tout le secteur situé entre l'hôpital, et la RN 113.

Le calage du profil en long est fixé essentiellement par le niveau du toit des calcaires du crétacé. Le niveau des calcaires ne semble pas avoir fait l'objet de sondages de reconnaissance. La coupe au profil 28 laisse apparaître un toit de la formation calcaire à la cote -25 NGF. D'autres documents laissent apparaître une ondulation du toit du calcaire avec des points à -30 NGF. La couverture rocheuse au-dessus du tunnel serait alors de l'ordre de cinq mètres, ce qui est faible. La couverture rocheuse, dans le calage actuel, est également faible, voire insuffisante, entre le canal du Viguerat et le canal de la vallée des Baux.

La connaissance du niveau du toit du calcaire est imprécise et nécessite des investigations complémentaires. Ceci ne remet pas en cause le principe de la solution proposée. Le niveau du tunnel peut être abaissé sans difficulté de 5 à 8 m et la déclivité des rampes d'accès portée de 3% à 4% (comme justifié au §4.1 ci-dessus). La longueur des rampes d'accès serait également réduite de même que les longueurs des zones mixtes de transition (calcaire /alluvions et cailloutis/alluvions) dont les coûts sont élevés compte tenu de la nécessité de renforcement des sols et de mise en œuvre de dispositifs de soutènement plus importants. Les soutènements dans les calcaires et les cailloutis pourraient être partiellement allégés. La longueur forée reste sans évolution majeure.

Cette variante comporte 845 m de tranchée couverte en rive droite et 1.115 m en rive gauche. Deux modes de construction peuvent être envisagés :

- ▮ la méthode proposée au mémoire de synthèse de 2003. Construction des structures in situ à l'air libre en fond de fouille après assèchement de la fouille,
- ▮ ces structures sont situées pour plus de la moitié de leur longueur à un niveau altimétrique qui permettrait d'utiliser la méthode de caissons préfabriqués immergés. Ces caissons pourraient être préfabriqués en surface, en tête de la rampe d'accès, puis mis à l'eau par poussage en utilisant la rampe d'accès comme rampe de mise à l'eau. Les caissons sont ensuite flottés jusqu'à leur emplacement puis immergés. Les tronçons situés dans les secteurs où le tirant d'eau est insuffisant peuvent être construits :
 - soit en fond de fouille à l'air libre,
 - soit hors d'eau, sur la rampe dont la pente est rectiligne, en utilisant les méthodes des ponts poussés.

Cette variante comporte une gaine d'extraction des fumées. Les « usines » de ventilation pourraient être implantées dans des puits situés aux extrémités de la section forée. Ces puits pourraient être aménagés pour réaliser une partie des travaux des tunnels forés dans l'attente de pouvoir disposer d'accès par les rampes d'accès, si les impératifs de délais l'exigeaient.

4.6.3 Variante 3

La variante 3 se caractérise par un tunnel foré de 725 m environ de longueur pour le passage sous le Rhône. Le tunnel est situé en totalité dans les matériaux alluvionnaires et s'appuie sur le toit des calcaires. Les rampes sont réalisées à l'air libre en tranchée couverte entre des parois moulées pouvant atteindre une cinquantaine de mètres de profondeur. Le tunnel est situé en totalité dans les matériaux alluvionnaires et s'appuie sur le toit des calcaires (à noter que le niveau du toit calcaire au P 29 diffère entre le profil en long et la coupe).

La couverture des sols au-dessus du tunnel est à peine de 7 à 8 m sous le niveau du fond du lit du Rhône.

L'excavation dans les terrains meubles nécessite une consolidation préalable des sols, qui doit être parfaite. Le mémoire de synthèse présente plusieurs modes de consolidation soit à partir de la surface, soit à l'avancement, soit à partir d'une galerie préalable de traitement de 3,70 m de diamètre d'intrados. Les deux premières méthodes sont écartées, compte tenu du contexte et des aléas.

La nature des sols semble très variable, et pour l'heure les sols sont insuffisamment identifiés de même que leurs caractéristiques. La présence de lentilles sableuses et de formations limoneuses est très probable. Il n'est pas démontré que l'auréole de 4 m de colonnes de jet grouting réalisée à partir de la galerie au-delà de la future section excavée soit suffisante et qu'elle ait toutes les exigences nécessaires, d'autant que la réalisation de cette auréole à des distances situées jusqu'à une dizaine de mètres de la galerie est questionable, compte tenu du diamètre intérieur de la galerie.

Cette alternative est difficile à maîtriser. Elle est extrêmement risquée compte tenu de la très faible couverture sous le fond du lit du Rhône. Il est de plus impossible d'évaluer de façon fiable le volume des injections complémentaires à la résine qui seraient nécessaires pour garantir la parfaite stabilité et étanchéité de la couronne traitée et de l'ensemble.

Cette variante comporte des risques techniques très importants, associés à des aléas financiers difficiles à évaluer. Elle n'est pas crédible et doit être éliminée.

Les travaux relatifs aux tranchées couvertes appellent les mêmes commentaires que ceux faits au §4.6 1 ci-dessus.

De manière générale cette variante apporte très peu d'avantages par rapport à la variante 1, si ce n'est un passage en souterrain du cirque romain permettant sa préservation. Elle présente de plus l'inconvénient majeur de remplacer une technique bien éprouvée pour la traversée du Rhône (caissons immergés) par des techniques certes éprouvées, mais dont la réalisation et les résultats comportent des risques majeurs compte tenu de la faible profondeur sous le niveau du fond du lit du Rhône et de l'hétérogénéité des matériaux alluvionnaires traversés.

4.6.4 Variante 4

Cette variante n'est accompagnée d'aucun schéma ni profil en long. Toutefois la lecture du mémoire de synthèse permet d'en imaginer le concept.

La longueur totale couverte (tunnel foré et tranchées couvertes) est similaire à celle de la variante 3. On peut donc penser que le profil en long est similaire, d'autant qu'il est mentionné dans le mémoire que le tunnel est situé essentiellement dans les matériaux alluvionnaires.

Le diamètre de 13,2 m d'excavation mentionné au mémoire est à corriger pour tenir compte des dispositions relatives à la sécurité mentionnées au §4.1 ci-dessus, des tolérances de construction, de l'épaisseur des voussoirs qui est à renforcer, du vide annulaire de construction en extradados, et de l'aménagement d'un des trottoirs pour permettre l'accès à la galerie d'évacuation sous chaussée. Le diamètre d'excavation serait de l'ordre de 15,50 m, ce qui à l'heure actuelle correspond à une gamme de diamètres de plus en plus courants.

L'épaisseur des alluvions entre le fond du lit du Rhône est de l'ordre de 12 à 17 m selon les hypothèses d'un toit des calcaires à -25 m ou -30 m NGF. L'épaisseur de ces formations est insuffisante pour insérer le tunnelier dans les terrains meubles et pour disposer de suffisamment de couverture permettant d'assurer la stabilité de l'excavation en cours de travaux et après la réalisation des travaux.

Le profil en long doit nécessairement être abaissé d'une douzaine de mètres, ce qui conduit à des longueurs d'ouvrage plus importantes. Cet abaissement du profil en long place le tunnelier dans des conditions mixtes d'excavation (alluvions et calcaires) très difficiles à gérer et sujettes à des risques élevés d'incidents mécaniques lors de la réalisation des travaux, bien que les calcaires soient présentés comme très lités.

La solution présentée n'est pas réalisable en l'état.

Une variante d'exécution au tunnelier peut être envisagée sur une base de profil en long voisin de celui de la variante 2 aménagée. Le tunnelier est alors situé dans les formations calcaires sauf dans les zones de transition qui pourraient nécessiter quelques dispositions additionnelles. Compte tenu de la longueur totale de tunnel à forer (6,8 km) une réalisation au tunnelier serait financièrement plus économique qu'une excavation conventionnelle. Il s'agit alors d'une variante d'exécution à la variante 2.

4.7 Délais de construction

Le mémoire indique des délais de construction pour chacune des quatre variantes analysées. Aucune esquisse préliminaire de diagramme « chemin de fer » n'est présentée pour étayer les enchaînements et délais annoncés. Quelques indications de cadences sont données. Les délais résultent d'additions, dont l'origine des facteurs n'est pas toujours explicitée.

Il n'est en général pas fait mention des travaux de génie civil de second œuvre ni des travaux d'installations des équipements de sécurité et d'exploitation.

variante	nature d'ouvrage	longueur tunnel (ml)	délais (ans)
Variante V1	caisson immergé - tranchée couverte	2 563	6,0
Variante V2	tunnel foré au rocher - tranchée couverte	5 342	8,5
Variante V3	tunnel foré en terrain meuble - tranchée couverte	2 938	8,0
Variante V4	tunnelier - tranchée couverte	2 950	8,5

Figure 3 - délais de construction mentionnés dans le mémoire de synthèse

Les délais de construction sont largement surévalués, mais il est difficile d'en trouver la raison à défaut d'un manque d'information.

En première approche les délais devraient se situer dans une fourchette de 3,5 à 5 ans. Il est impossible de donner une appréciation plus précise. Elle nécessiterait d'esquisser des solutions techniques prenant en compte les nouvelles exigences en matière de sécurité, puis d'établir des diagrammes « chemin de fer » préliminaires, qui ne sont pas réalisables dans le cas de la présente note d'expertise.

4.8 Coûts de construction et d'exploitation

Le mémoire de synthèse des études préliminaires de 2003 comporte des coûts de construction qui sont récapitulés dans le tableau ci-dessous. Il ne comporte aucune évaluation des coûts d'exploitation, d'entretien et de maintenance, ni des grosses réparations.

variante	nature d'ouvrage	longueur tunnel (ml)	coûts en M€ TTC 2003
Variante V1	caisson immergé - tranchée couverte	2 563	615
Variante V2	tunnel foré au rocher - tranchée couverte	5 342	1 180
Variante V3	tunnel foré en terrain meuble - tranchée couverte	2 938	735
Variante V4	tunnelier - tranchée couverte	2 950	830

Figure 4 - estimation des coûts de construction définis dans le mémoire de synthèse de 2003

Le mémoire de synthèse ne comporte aucune information sur les hypothèses et la façon dont les coûts de construction ont été estimés. Il ne comporte également aucune donnée relative aux quantités principales ni à des prix unitaires synthétiques. Il est impossible d'évaluer la pertinence de ces estimations.

Il est difficile de faire une estimation des prix de construction des diverses variantes avant d'avoir procédé à leur mise à jour pour tenir compte notamment de leur indispensable adaptation aux nouvelles exigences en termes de sécurité, pour tenir compte également de l'élargissement de la plateforme, ainsi que des protections passives des structures contre l'incendie et, pour les TMD, des installations fixes de lutte contre l'incendie et pour prendre en compte aussi le cas échéant des optimisations potentielles mentionnées dans les analyses ci-dessus.

Les estimations des variantes V3 et V4 sont à écarter :

- La variante V3 est trop aléatoire du point de vue technique pour pouvoir être prise en considération. En tout état de cause il faudrait également tenir compte d'un renchérissement notoire des travaux d'injection,
- La variante V4 présentée correspond à un projet qui n'est pas faisable en l'état. Le profil en long et les caractéristiques des ouvrages doivent être repris.

5. SYNTHÈSE

Le dossier d'études préliminaires date de mars 2003. La réglementation et les exigences en matière de sécurité ont évolué de façon très importante depuis cette date. Les variantes présentées ne répondent plus aux nouvelles exigences et doivent être reprises de façon importante, avec un certain nombre d'impacts majeurs concernant notamment le désenfumage, les évacuations, les puissances d'incendie, la résistance au feu des structures et les transports des matières dangereuses.

Une troisième voie est indispensable pour les PL sur toute la longueur du tunnel et de part et d'autre du tunnel sur des longueurs permettant de procéder aux changements de voies, ainsi qu'à l'organisation de la circulation avant l'entrée en tunnel et après la sortie du tunnel. Cette troisième voie est motivée par des problèmes de capacité d'une part, et pour éviter d'autre part des changements de voies intempestifs en tunnel à l'approche des rampes de sortie. Elle est également nécessaire pour éviter la formation inévitable de bouchons dans les mêmes zones en cas de tubes à deux voies.

L'urbanisation a évolué de façon importante, essentiellement en rive droite du Rhône, et de nombreuses constructions récentes (pavillonnaires et industrielles) devront être détruites.

Le dossier d'études préliminaires est relativement succinct en matière de géologie et de reconnaissance des sols. Le niveau du toit des calcaires est imprécis, sujet à interprétation avec un impact direct sur les différentes solutions et le calage de leur profil en long. Les concepts de sécurité, de ventilation et des exigences en matière de protection au feu des structures sont bibliographiques et ne correspondent pas aux particularités du tunnel, à son environnement géomécanique et à la nature de la circulation et du trafic sur l'itinéraire.

Les variantes V1 et V2 sont recevables dans leur principe et leur concept. Elles doivent toutefois être modifiées pour tenir compte de l'évolution de la réglementation, ainsi que des observations et suggestions faites dans la présente note d'expertise.

La variante V3 doit être écartée. Elle présente trop d'aléas techniques et financiers. De plus sa faisabilité réelle n'est pas démontrée.

La variante V4 n'est pas réalisable en l'état compte tenu de l'épaisseur réduite des formations alluvionnaires entre le fond du lit du Rhône et le toit des calcaires. Le concept d'une réalisation du tunnel foré au tunnelier n'est pas en cause, mais le profil en long présenté n'est pas adapté. Une variante au tunnelier est possible et même souhaitable sur la base du profil en long de la variante 2 avec l'abaissement proposé. Compte tenu de la longueur totale de 6,8 km à réaliser en tunnel foré, un mode de construction au tunnelier serait d'ailleurs financièrement plus compétitif qu'une excavation en méthode conventionnelle.

Les délais de construction sont très surévalués. En première approche les délais devraient se situer dans une fourchette de 3,5 à 5 ans.

L'estimation des coûts de construction ne peut pas être recalée de façon fiable sans avoir procédé au préalable à la mise à jour des deux variantes V1 et V2 en tenant compte des commentaires faits ci-dessus, en intégrant de plus les optimisations relatives aux méthodes de construction :

- Pour V1 : caissons immergés étendus en dehors du passage sous le Rhône,
- Pour V2 : alternative de construction au tunnelier et abaissement du profil en long, tels que caractérisés dans la variante V5 schématisée en annexe.

À titre d'information très préliminaire les coûts de construction se situent dans les ordres de grandeur suivants mentionnés dans le tableau ci-dessous qui récapitule également les commentaires principaux relatifs à chacune des variantes.

variante	nature d'ouvrage	commentaires	longueur tunnel	coûts en M€ TTC
Variante V1	caisson immergé - tranchée couverte	réalisable techniquement - très intrusive du point de vue environnemental - impact foncier et patrimoine majeur	2 563 ml	900 M€
Variante V2	tunnel foré au rocher - tranchée couverte	réalisable - optimisable en variante V5	5 342 ml	optimisation par V5
Variante V3	tunnel foré en terrain meuble - tranchée couverte	faisabilité non démontrée - aléas techniques et financiers majeurs	2 938 ml	sans objet
Variante V4	tunnelier - tranchée couverte	non définie - non réalisable en l'état	2 950 ml	sans objet
Variante V5	tunnel foré au tunnelier multi-modes - tranchée couverte	pas de difficulté technique majeur - faible impact urbain et environnemental	5 310 ml	1 160 M€

Figure 5 - commentaires synthétiques - évaluation des coûts des travaux de construction

Nota :

Les estimations concernent les travaux de construction y compris provision pour aléas. Ils ne comportent pas les coûts d'acquisitions foncières, ni les dépenses de maîtrise d'ouvrage et de maîtrise d'œuvre.

Commentaires complémentaires concernant l'estimation de la variante V1. Ne sont pas pris en compte :

- les coûts de maîtrise foncière et d'indemnités commerciales qui peuvent s'élever à plusieurs dizaines de millions d'euros compte tenu du nombre important de bâtiments récents à démolir et vraisemblablement d'indemnités pour les locaux à caractère commercial ou artisanal,
- les coûts de dépollution des matériaux de fouilles dans le lit du Rhône et celui du canal de navigation d'Arles à Bouloc, ainsi que de leur transport et de leur mise en dépôt définitif qui peuvent s'élever à plusieurs dizaines de millions d'euros.

Commentaires complémentaires concernant l'estimation de la variante V5 :

- les coûts de maîtrise foncière sont réduits, l'ouvrage ayant un très faible impact en surface,
- les estimations de la variante V5 concernent le tunnel sans TMD. Le surcoût relatif au passage des TMD peut être évalué en première approche à une soixantaine de millions d'euros TTC.

La faisabilité et la fiabilité des variantes V1 et V5 sont de même niveau. La variante V5 est de l'ordre de 23% plus onéreuse (avec prise en compte des coûts du foncier, de la dépollution et des mises en dépôts mentionnés au nota ci-dessus). Toutefois :

- l'acceptabilité de la variante V1 n'est pas démontrée. Elle a un impact majeur du point de vue du patrimoine et nécessite la démolition de très nombreuses constructions récentes en zones artisanales ou pavillonnaires,
- de nombreuses questions restent en instance vis-à-vis notamment des contraintes de travaux par rapport à la navigation fluviale, le régime hydraulique du Rhône, le transport et la mise en dépôt des matériaux de fouilles (en partie pollués) extraits dans les tranchées des accès.

Les nouvelles dispositions mentionnées ci-dessus concernant la ventilation et les évacuations conduisent à réduire les points de contact en surface de façon très importante, ainsi que les impacts environnementaux qui leur sont associés.

6. ANNEXE

La présente annexe a pour objet de caractériser et de décrire succinctement la variante sous fluviale longue. Il ne s'agit pas d'un avant-projet ni d'une étude préliminaire, mais d'une esquisse destinée à analyser la faisabilité, caractériser l'ouvrage et en évaluer succinctement les coûts de construction.

6.1 Principales caractéristiques géométriques de la variante VsF longue

6.1.1 Concept

L'évolution de la technologie des tunneliers permet de disposer de machines multimodes susceptibles d'assurer l'excavation et le soutènement tant dans des roches dures que dans des sols, avec un mode de fonctionnement selon les besoins soit en mode ouvert, soit en mode pressurisé. Ce type de machines, encore assez peu répandues, sont en amélioration continue pour faire face aux conditions diverses rencontrées dans le milieu souterrain.

La variante V5 est basée sur l'emploi de ces nouveaux matériels et technologies. L'esquisse présentée tient compte des informations relatives à la géologie, l'hydrogéologie et les caractéristiques mécaniques des formations rencontrées. Les informations actuelles sont relativement sommaires et nécessiteront des études et reconnaissances beaucoup plus détaillées si cette variante était adoptée.

Le tunnel comporte deux natures de structures :

- un tronçon central excavé au tunnelier multimode dans les terrains alluvionnaires, les formations marno-calcaires et les cailloutis consolidés. Une couverture minimale d'une quinzaine de mètres a été prise en compte dans les alluvions pour permettre d'assurer la stabilité de l'excavation et l'équilibre de la pression au front,
- de part et d'autre des tronçons réalisés en tranchée couverte à l'air libre entre parois moulées.

6.1.2 Profil en long

Le profil en long est schématisé en figure 6 ci-dessous. La déclivité des rampes d'accès est de 4% (voir justification au § 4.1.1). Le tronçon inférieur du profil en long présente une déclivité de 0,5%. Il suit sensiblement le toit de la formation des marno-calcaires. Le profil en long a été calé de façon à s'inscrire sur la plus grande longueur possible dans les formations marno-calcaires et des cailloutis cimentés.

La ligne rouge (tiretés rouges) présente un point bas voisin de la cote -56 NGF.

La longueur du tunnel foré est de 4.300 m. La longueur de l'accès Ouest en tranchée couverte est de 450 m. Celui de l'accès Est est de 560 m. Les longueurs des trémies à l'air libre sont respectivement de 450 m et 540 m. La longueur totale souterraine est de 5.310 m.

L'ouvrage comporte deux puits verticaux aux interfaces entre le tunnel foré et les tronçons en tranchée couverte, d'une trentaine de mètres de profondeur. Ces puits verticaux utilisés lors des travaux de construction sont intégrés au système de ventilation et au concept général d'évacuation.

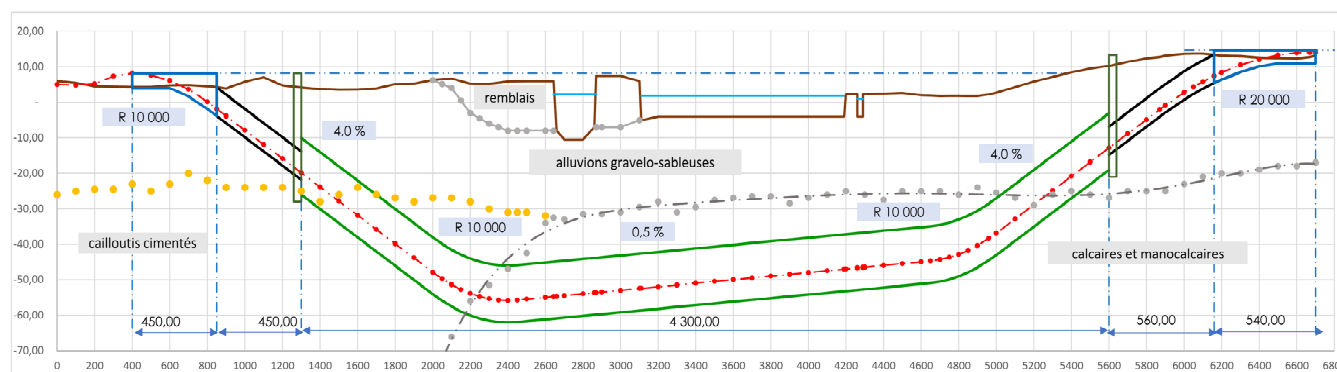


Figure - profil en long schématique

Nota : les informations relatives à la géologie et la géotechnique sont issues des profils en long des études préliminaires de 2003.

6.1.3 Profils en travers type

Comme défini au § 4.1.2 ci-dessus le tunnel comporte deux chaussées à trois voies de circulation, de 3,50 m de largeur. La largeur roulable entre bordures de trottoirs est ainsi de 11,50 m. Le gabarit de passage des véhicules est de 4,75 m. La chaussée est bordée de part et d'autre par des trottoirs piétons de 0,95 m de largeur minimale.

6.1.3.1 Profil en travers type en "tranchée couverte"

Le profil en travers type en section courante est représenté par la figure 7 ci-dessous. Il comporte deux espaces de circulation séparés par une galerie d'évacuation.

La ventilation est du type « longitudinal » avec des accélérateurs logés en plafond dans les renforcements. Elle comporte une gaine de désenfumage en cas d'incendie. Cette gaine de désenfumage peut également être utilisée en conditions normales de circulation, soit en cas de congestion du trafic, soit pour améliorer les conditions de rejet et de dispersion de l'air pollué en cas de trafic intense (rejet par les puits de ventilation permettant une meilleure dispersion au lieu d'un rejet naturel par les têtes de tunnel).

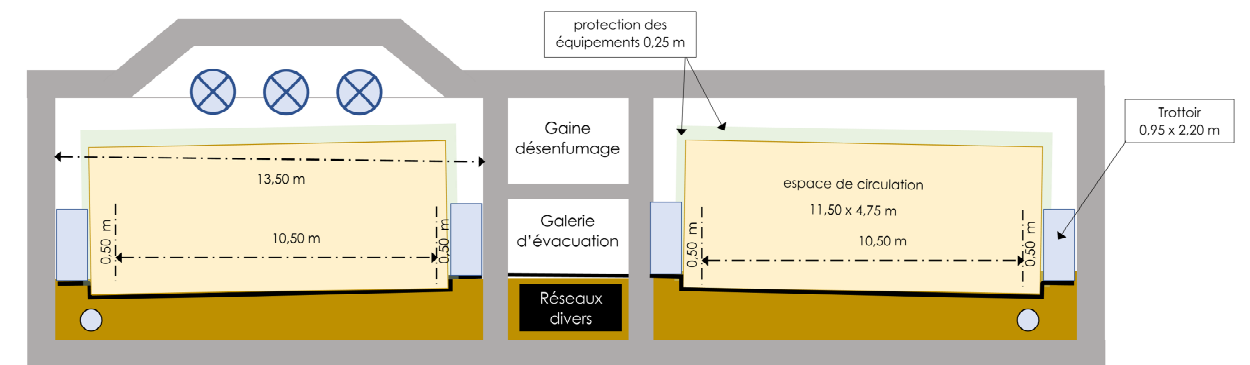


Figure - profil en travers type tranchée couverte

Dans les zones de raccordement avec les deux tubes forés, les deux espaces de circulation et la galerie associée sont dissociés et se présentent sous une forme d'un Y comme figuré ci-contre.

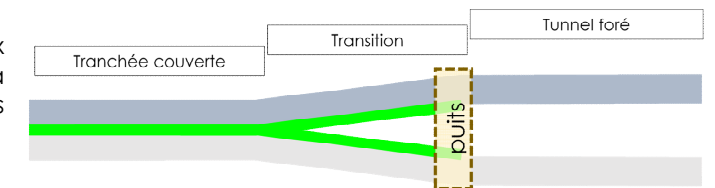


Figure - raccordement tranchée couverte / tunnel foré

Les concepts de ventilation en conditions normales d'exploitation, ainsi qu'en en cas d'incendie sont présentés au § 6.3 ci-dessous. Ceux relatifs à l'évacuation et la sécurité sont présentés au § 6.2 ci-dessous.

6.1.3.2 Profil en travers type au tunnelier

La figure 9 ci-contre schématise le profil en travers type de la section courante au tunnelier. Le diamètre d'excavation est de l'ordre de 15,90 m, ce qui constitue une section importante, mais très courante.

Le concept de ventilation est identique à celui de la tranchée couverte, la gaine de désenfumage est située sous chaussée et les fumées sont extraites en voûte par des carneaux espacés d'une centaine de mètres.

La galerie d'évacuation est située sous la chaussée. Cette disposition évite la réalisation de galeries usuelles de connexion entre les deux tubes, dont la réalisation est laborieuse et très coûteuse dans les alluvions sous le niveau de la nappe phréatique (travaux sous congélation des sols).

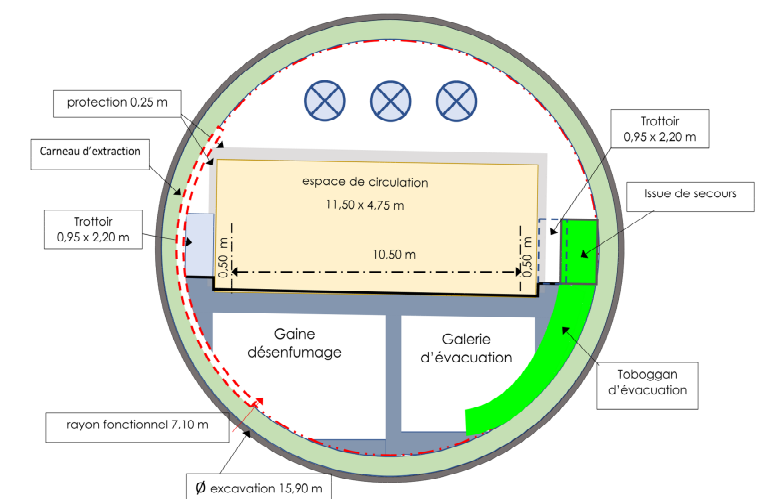


Figure - profil en travers type - section au tunnelier

6.2 Concept de ventilation

Le présent paragraphe présente le concept des installations de ventilation pris en compte dans cette description schématique. Le dimensionnement des installations ne fait pas partie du présent audit.

L'installation de ventilation est du type « longitudinal » et comporte une gaine de désenfumage en cas d'incendie, ainsi que deux puits de ventilation.

6.2.1 Conditions normales de circulation

Dans chaque tube, un courant d'air longitudinal est généré par la circulation et les accélérateurs en voûte dans le sens de la circulation pour apporter de l'air frais et diluer la pollution.



Figure 10 – ventilation en conditions normales de circulation

L'air frais circule de la tête d'entrée en tunnel vers la tête de sortie du tunnel. Dans certaines conditions de trafic, et pour réduire la vitesse d'écoulement de l'air dans les tronçons en tranchée couverte (dont la surface de section est plus faible que celle du tunnel foré), il conviendra de faire un apport d'air frais additionnel par le puits proche de l'entrée en tunnel, et de rejeter une partie de l'air pollué par le puits proche de la sortie du tunnel.

Un rejet de l'air pollué par le puits de ventilation proche de la sortie du tunnel peut également être privilégié pour des motifs environnementaux d'amélioration de la dispersion de l'air pollué dans l'atmosphère. Cette disposition peut s'accompagner en cas de trafic intense par une extraction d'une partie de l'air pollué par la gaine de désenfumage.

L'installation comporte essentiellement des accélérateurs en voûte ou en plafond dans chacun des deux espaces de circulation, ainsi que des ventilateurs d'injection d'air frais et d'extraction des fumées ou d'une partie de l'air pollué qui sont installés dans chaque puits.

6.2.2 Ventilation de désenfumage en cas d'incendie

L'extraction des fumées est assurée par une gaine de désenfumage au moyen de bouches motorisées télécommandées distantes d'une centaine de mètres. Pour les tronçons du tunnel foré, les fumées sont extraites en voûte et dirigées par un carneau de ventilation vers la gaine de ventilation située sous la chaussée. Les fumées dans les gaines sont extraites en direction des deux puits de ventilation et rejetées à l'air libre.

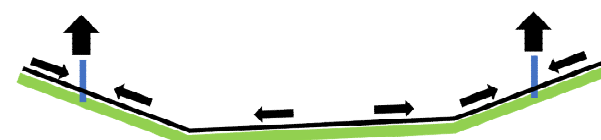


Figure 11- ventilation en cas d'incendie

Les accélérateurs sont utilisés pour gérer le courant d'air dans le tunnel et confiner au mieux les fumées dans la zone de l'incendie. Ils peuvent être utilisés dans un second temps pour balayer le reliquat des fumées dans la mesure où tous les usagers et intervenants ont quitté le tronçon de tunnel situé en aval de l'incendie.

6.3 Concept d'évacuation et de sécurité

Le présent paragraphe présente le concept d'évacuation en cas d'incident et notamment d'incendie pris en compte dans cette description schématique. Le dimensionnement des installations ne fait pas partie du présent audit et ne pourra être fait ultérieurement qu'après les études spécifiques de risques et les études comparatives particulières relatives au passage éventuel des véhicules transportant des matières dangereuses (TMD).

Dans les tronçons en tranchée couverte, les usagers sont évacués vers une galerie d'évacuation située entre les deux espaces de circulation et commune à ces deux espaces. Une évacuation directe de l'espace de circulation affecté par un incendie vers l'espace de circulation sain n'est pas possible tant que les conditions de mise en sécurité ne sont pas assurées dans le tube sain et en l'absence d'espace tampon permettant d'attendre la mise hors circulation du tube sain.

Dans le tronçon en tunnel foré, l'évacuation des usagers est assurée dans chaque tube vers la galerie située sous la chaussée par l'intermédiaire d'un toboggan. Cette solution développée en 2000 pour le tunnel d'El Azhar au Caire est devenue un mode courant (voire parfois une norme) dans plusieurs pays pour des tunnels situés sous le niveau de la nappe phréatique dans des matériaux meubles souvent alluvionnaires. La création de galeries d'interconnexion entre les deux tubes (qui est le mode usuel) nécessite alors des méthodes de construction très coûteuses (congélation ou injections très denses). L'accès des secours est alors possible à partir de la galerie par l'intermédiaire d'échelons débouchant en surface des trottoirs par des trappons.

Les usagers, une fois mis en sécurité dans la galerie d'évacuation, sont ensuite dirigés vers les têtes de tunnel et le cas échéant vers des issues de secours à l'air libre aménagées dans les deux puits.

Les issues de secours entre les espaces de circulation et les galeries d'évacuation ont un coût très marginal et peuvent être aménagées avec un espacement d'une centaine de mètres.

Dans toute la partie centrale du tunnel foré dans les formations marno-calcaires, et le cas échéant dans les cailloutis consolidés (longueur cumulée d'environ 3.600 m), il est possible d'aménager des galeries de connexion à niveau entre les deux tubes pour les véhicules d'intervention de secours.

6.4 Exploitation et sécurité

La présence du tunnel entraîne pour cette variante V5 des coûts d'exploitation, d'entretien et de maintenance plus élevés que pour les variantes à l'air libre. Il est nécessaire de disposer d'un centre de supervision avec une présence d'opérateurs 24h/24h et 7j/7j. Ce centre n'est pas dédié au tunnel et ne nécessite pas une implantation sur le site ou à proximité immédiate. Il peut être situé à plusieurs centaines de kilomètres du site et partagé avec d'autres fonctions de supervision (section courante – autres tunnels) nécessitant une présence permanente, comme c'est généralement le cas en France ou à l'étranger sur des réseaux autoroutiers.

Les opérations d'entretien et de maintenance ne nécessitent pas d'interruption du trafic ou de mise hors service temporaire du tunnel. Elles sont réalisées en sécurité sous circulation, moyennant des restrictions temporaires dans des conditions d'autant plus favorables que chaque sens dispose de trois voies de circulation.

Le Centre de Secours principal d'Arles et le Centre Hospitalier sont situés à moins de 1,5 km de la tête Est du tunnel, permettant de garantir des délais d'intervention très réduits.

6.5 Transports de matières dangereuses (TMD)

Le passage des TMD dans un tunnel est un problème complexe qui nécessite une approche méthodologique sans laisser cours à un libre arbitre ou à une attitude émotionnelle.

C'est la raison pour laquelle la réglementation française, ainsi que la réglementation européenne relatives au passage des matières dangereuses dans les tunnels, rendent obligatoire une étude EQR (évaluation quantitative des risques). Cette étude a pour objet de déterminer de façon rigoureuse et factuelle l'itinéraire présentant le moins de risques entre l'itinéraire en tunnel et les itinéraires alternatifs au passage en tunnel. L'EQR prend en compte de très nombreuses composantes et paramètres obligatoires à considérer.

La décision d'autoriser ou non les TMD en tunnel ne peut être prise qu'à la suite de cette étude et en fonction des résultats. Cette décision ne peut pas être prise de façon arbitraire à cette étape du projet.

Dans le cas de la variante de tunnel V5, le passage des TMD en tunnel introduirait un certain nombre d'adaptations concernant en première approche les points suivants :

- ▶ L'installation de ventilation de désenfumage est à renforcer compte tenu du volume plus important de fumées produites par l'incendie. Ceci concerne essentiellement :
 - un renforcement des ventilateurs d'extraction situés dans les puits de ventilation,
 - probablement une augmentation de la section de la gaine de désenfumage dans les tronçons en tranchée couverte. La section de la gaine dans le tronçon construit au tunnelier devrait être suffisante,
- ▶ Le concept d'évacuation des usagers (issues de secours – galerie d'évacuation – sortie potentielle dans les puits) reste inchangé. L'interdistance de 100 m adoptée au § 6.3 ci-dessus n'est pas modifiée.
- ▶ La puissance d'incendie dégagée par un feu de matières dangereuses (200 à 250 MW) est beaucoup plus importante que celle dégagée par un trafic courant présentant une forte proportion de poids lourds (100 MW). Il est indispensable de renforcer la résistance des structures vis-à-vis de l'incendie, notamment dans les tronçons situés dans les alluvions, sous le niveau de la nappe phréatique. Des dommages importants à la structure dans ces secteurs (ce qui n'est pas le cas des tronçons situés dans les marno-calcaires) pourraient être catastrophiques et entraîner la ruine de l'ouvrage. Deux options sont envisageables :
 - un renforcement de la protection avec comme inconvénient majeur d'augmenter l'effet de « four réfractaire », et donc la température de l'air en tunnel au détriment des usagers qui disposeront de moins de temps pour rejoindre une issue de secours et se mettre en sécurité, ainsi que pour les pompiers qui devront intervenir avec un équipement et une protection personnelle renforcés,
 - l'installation d'un « système fixe de lutte contre l'incendie ». Un tel système n'est pas destiné à éteindre ou contenir l'incendie. Il sert essentiellement à réduire de façon très importante le niveau de température en tunnel, au bénéfice d'une moindre exposition des structures, des usagers et des pompiers.

La seconde solution est celle qui est la mieux adaptée au tunnel d'Arles qui n'est pas exposé à des conditions hivernales rigoureuses, notamment de gel. Du point de vue de la protection de la structure, l'installation d'un « système fixe de lutte contre l'incendie » pourrait être limitée aux tronçons de tunnel situés dans les alluvions. Une installation sur la totalité du tunnel est toutefois préférable. Elle permet d'éviter l'inconvénient majeur qui consisterait à avoir des plans d'intervention des secours, ainsi que des équipements à moduler en fonction du lieu de l'incendie et de la présence ou non d'un tel système dans la zone de l'incendie, avec des risques de confusion et au détriment de la sécurité.

L'évaluation du surcoût d'investissement pour permettre le passage des TMD en tunnel nécessite une étude préliminaire de la ventilation des deux options (avec et sans TMD). En première approche le surcoût devrait être de l'ordre d'une soixantaine de millions d'euros TTC.

6.6 Coûts de construction

Les coûts de construction ne peuvent pas être évalués de façon précise sans avoir établi au préalable un avant-projet préliminaire. Une approche raisonnablement fiable des coûts a été faite sur la base de l'esquisse présentée ci-dessus en la basant sur des ratios et des prix statistiques d'ordre pour des travaux similaires, moyennant un certain nombre d'adaptations liées à la géométrie et aux caractéristiques de l'ouvrage.

Les coûts de construction peuvent être estimés à environ 1.160 M€ TTC selon la décomposition synthétique ci-dessous en absence de passage des TMD.

	unité	quantité	prix unitaire	montant (k€)	sous-totaux (k€)
Tunnel foré					570 643
structure réalisée au tunnelier	m l	8 600	53 100 k€	456 660	
génie civil structures internes					
béton	m ³	136 700	300 €	41 010	
aciers HA	t	16 400	2,3 k€	37 720	
béton non armé	m ³	44 700	250 €	11 175	
coffrages outils dalle supérieure	unité	8	150 k€	1 200	
coffrage	unité	86 000	28 €	2 408	
génie civil second œuvre - asst - chaussée- trottoir	m l	8 600	1,0 k€	8 600	
protection thermique	m ²	247 300	48 €	11 870	
Puits de ventilation et d'évacuation					39 360
puits Ouest - parois moulées - fouilles	forfait	1	9 660 k€	9 660	
puits Ouest - génie civil	forfait	1	9 790 k€	9 790	
puits Ouest - équipements bâtiments	forfait	1	750 k€	750	
puits Est - parois moulées - fouilles	forfait	1	9 070 k€	9 070	
puits Est - génie civil	forfait	1	9 340 k€	9 340	
puits Est - équipements bâtiment	forfait	1	750 k€	750	
Travaux extérieurs et accès tête EST					66 150
tranchée couverte (parois - fouilles)	m l	450	62,0 k€	27 900	
tranchée couverte (structure - second œuvre-protection)	m l	450	65,0 k€	29 250	
trémie	m l	450	20,0 k€	9 000	
Travaux extérieurs et accès tête OUEST					81 240
tranchée couverte (parois - fouilles)	m l	560	64,0 k€	35 840	
tranchée couverte (structure - second œuvre-protection)	m l	560	65,0 k€	36 400	
trémie	m l	450	20,0 k€	9 000	
Equipements d'exploitation					101 030
équipements tunnel section courante	m l	10 620	6,5 k€	69 030	
puits ventilation / stations électriques	forfait	2	13 000 k€	26 000	
amenée d'énergie	forfait	1	2 000 k€	2 000	
PC de supervision	forfait	1	4 000 k€	4 000	
Divers					20 000
déviations- raccordements	forfait	1	10 000 k€	10 000	
aménagement divers de surface	forfait	1	10 000 k€	10 000	
Montant total HT					878 423
Montant TTC					1 054 108
Provisions					105 892
Montant TTC travaux de construction					1 160 000

Figure - tableau sommaire d'évaluation des coûts de construction

4.2 - Annexe 2 : Atlas cartographique

ETUDE D'ACTUALISATION DES FAMILLES DE PASSAGES EXPERTISE DES FAMILLES SOUS FLUVIALES

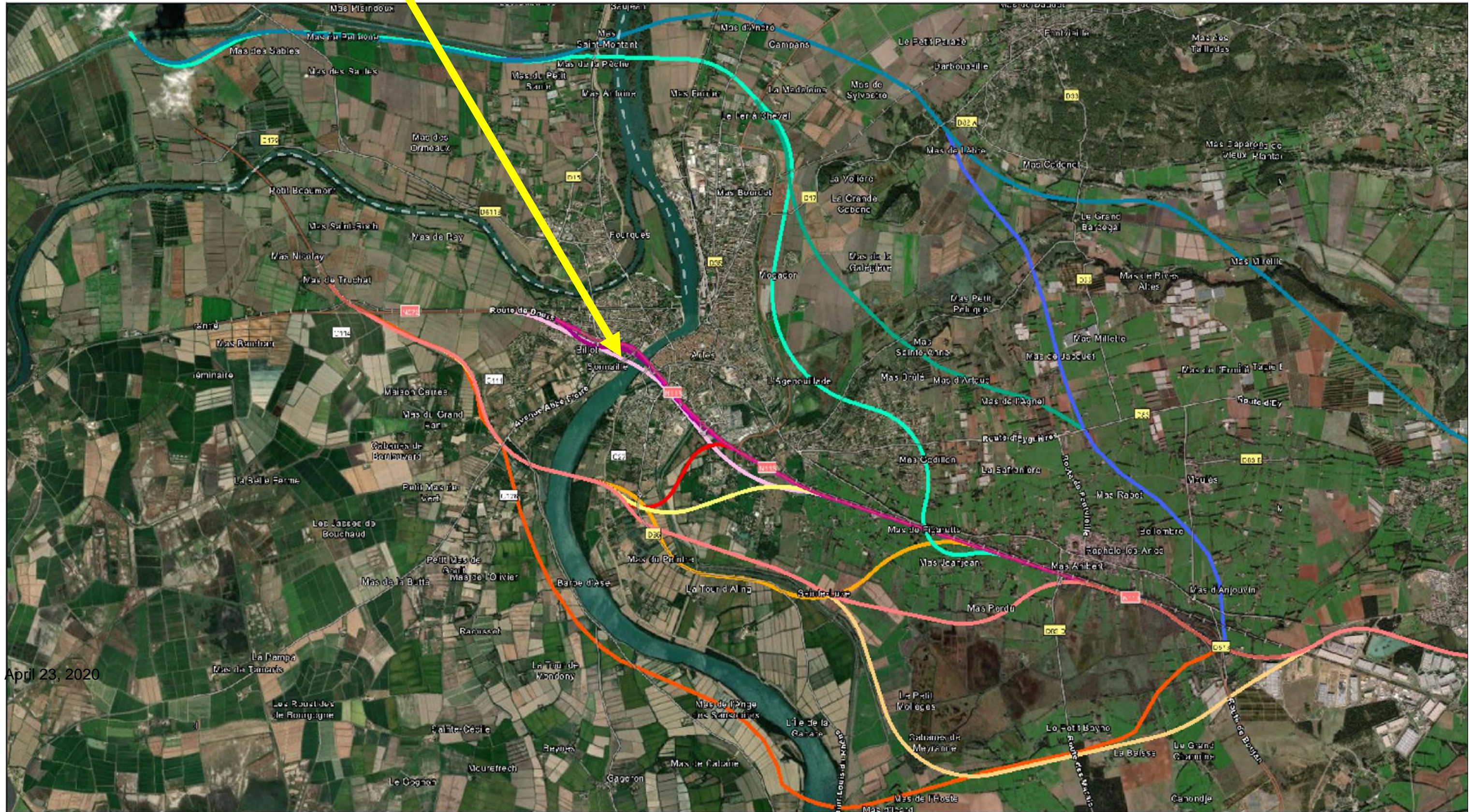
ATLAS CARTOGRAPHIQUE

Familles de Passage : Vue d'Ensemble
Familles de Passage : Natura 2000, Unesco, Archéologie
Familles de Passage : Rive Droite
Familles de Passage : Rive Gauche
Famille sous Fluviale Longue : Vue d'Ensemble
Famille sous Fluviale Longue : Entrée Ouest
Famille sous Fluviale Longue : Entrée Est
Famille sous Fluviale Courte : Vue d'Ensemble
Famille sous Fluviale Courte : Entrée Ouest
Famille sous Fluviale Courte : Entrée Est
Famille sous Fluviale Courte : Cirque Romain

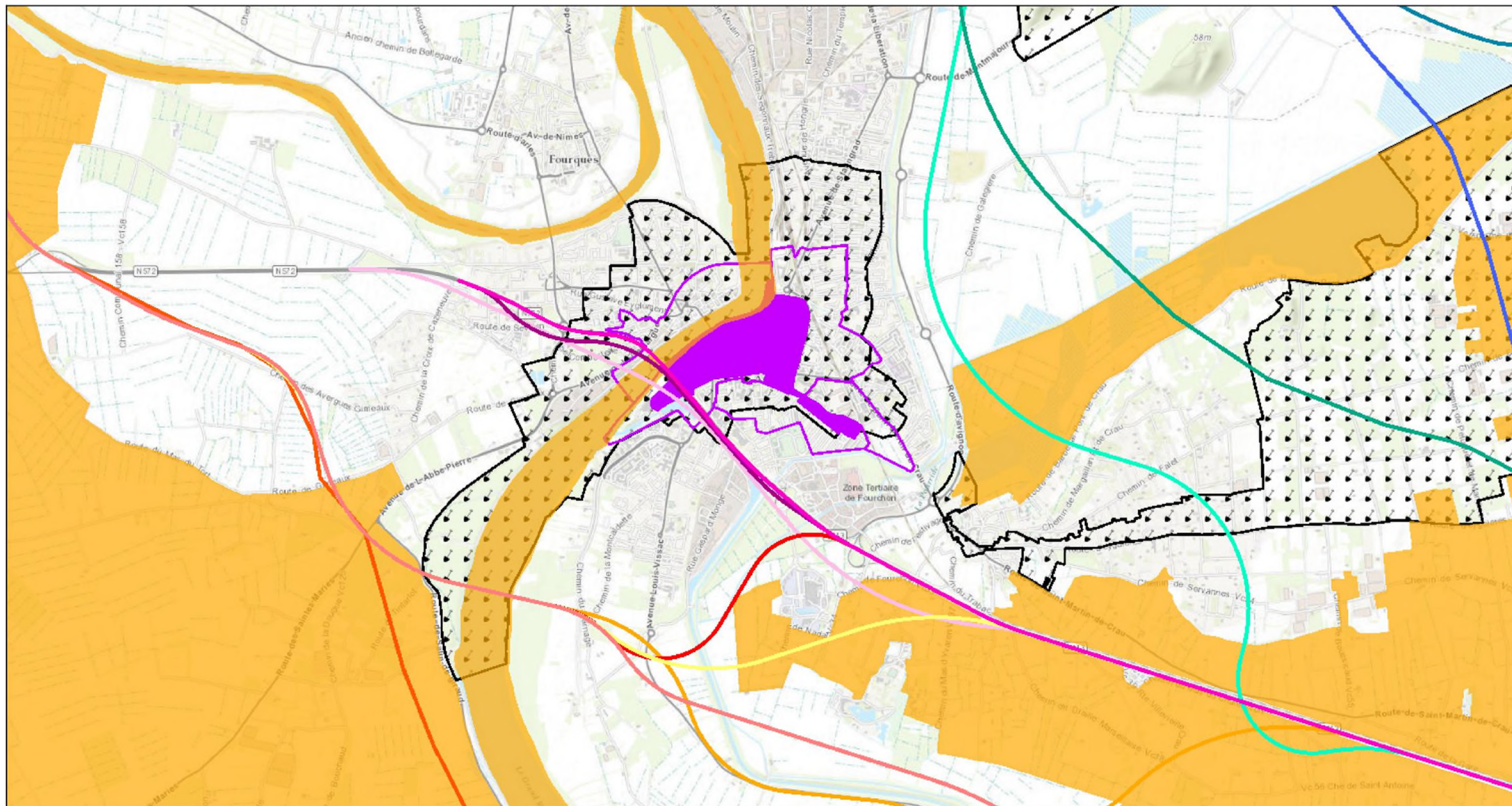
—

Familles de Passage : Vue d'ensemble

Variante Sous Fluviales



Familles de Passage : NATURA 2000, UNESCO & Archéologie



zones de présomption de prescription archéologique



Natura 2000 - Directive habitat - ZSC



Site UNESCO - ZONE TAMPON

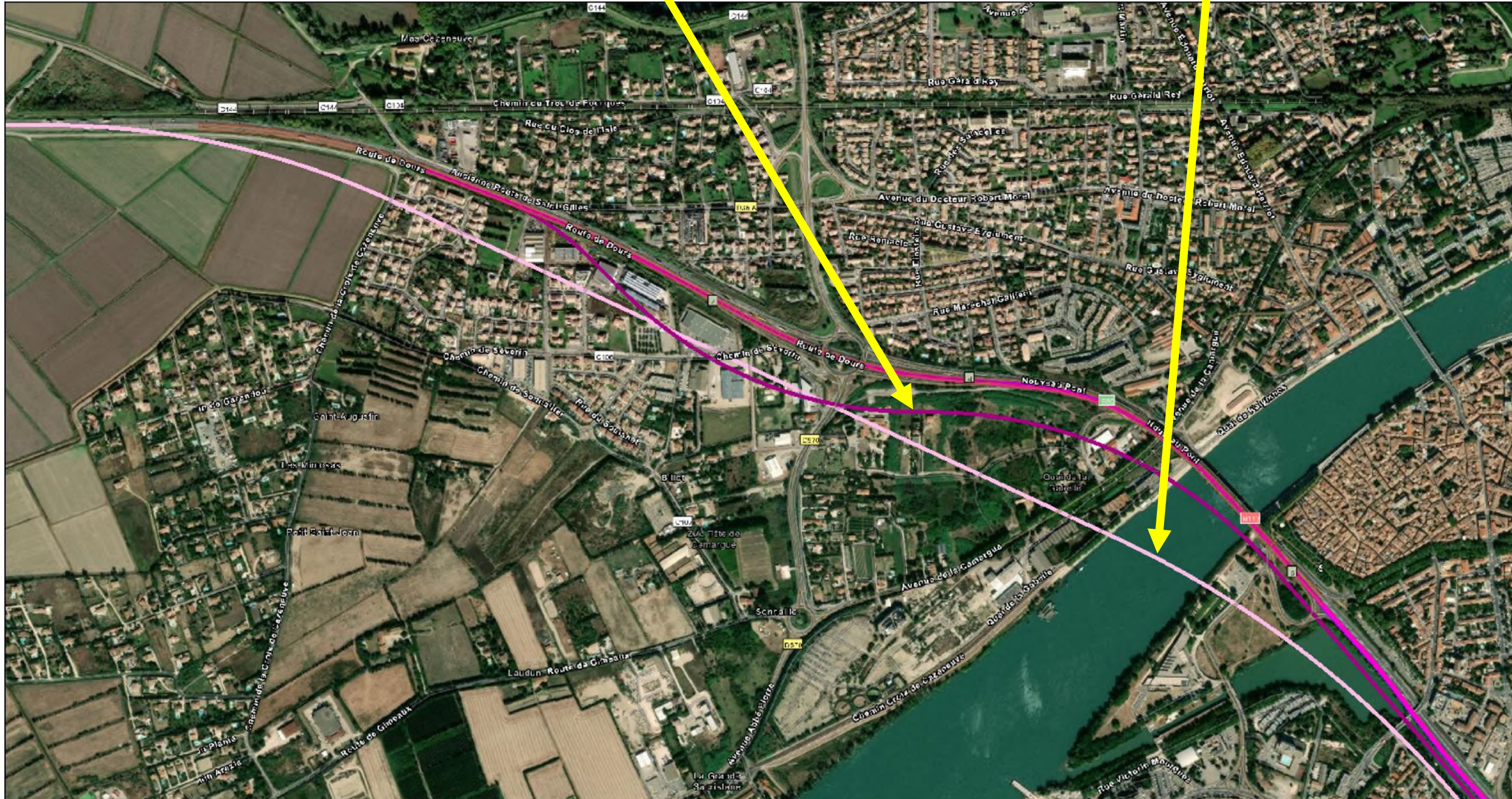


Site UNESCO

Familles Sous Fluviales : RIVE DROITE

Variante Sous Fluviale Courte

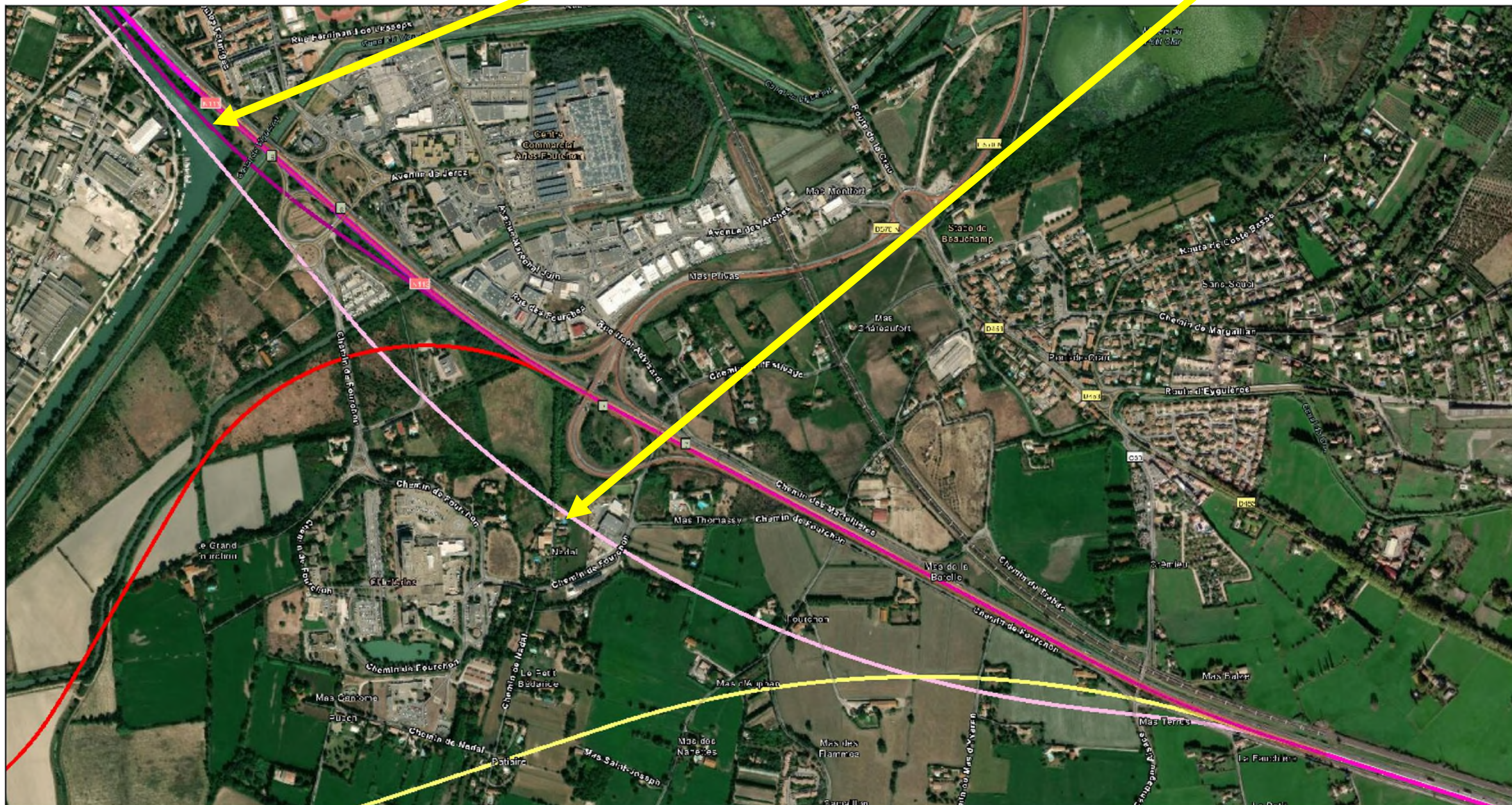
Variante Sous Fluviale Longue



Familles Sous Fluviales : RIVE GAUCHE

Variante Sous Fluviale Courte

Variante Sous Fluviale Longue



Variante Sous Fluviale Longue : VUE D'ENSEMBLE



Variante Sous Fluviale Longue : Entrée OUEST

Trémie Ouest

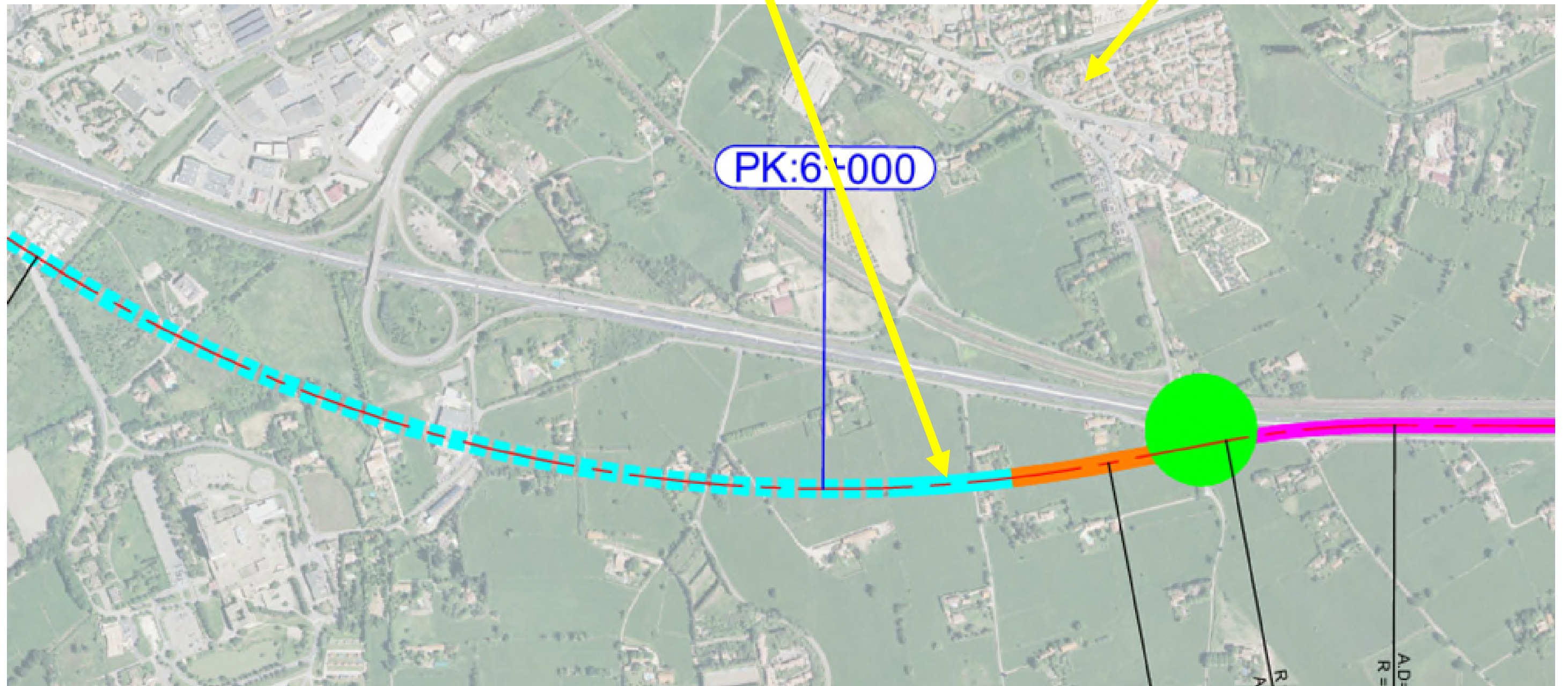
Quartier Vittier (Sud RN113)



Variante Sous Fluviale Longue : Entrée EST

Trémie Est

Pont de Crau



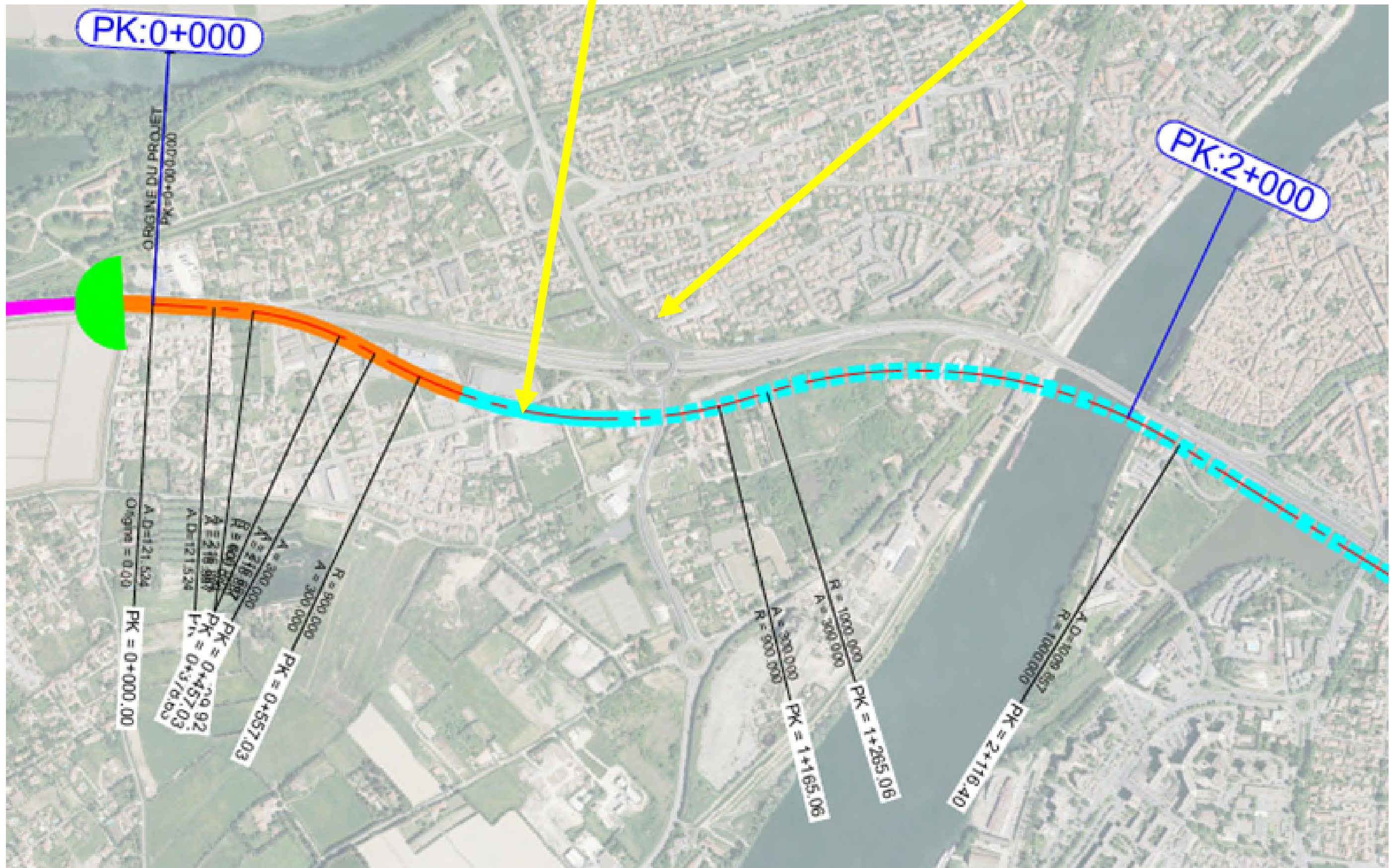
Variante Sous Fluviale Courte : VUE D'ENSEMBLE



Variante Sous Fluviale Courte : Entrée OUEST

Trémie Ouest

Quartier Vittier (Sud RN113)

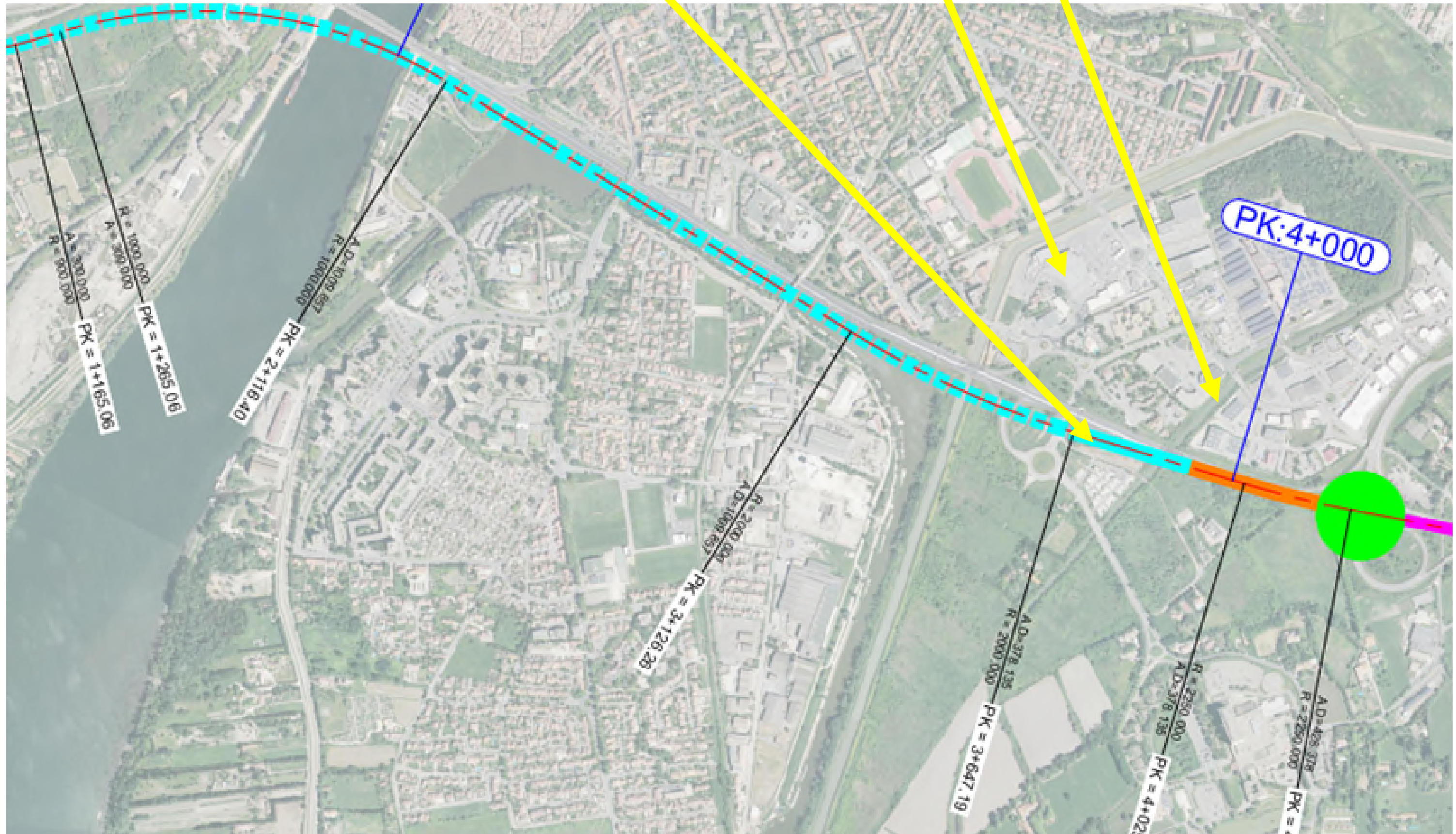


Variante Sous Fluviale Courte : Entrée EST

Trémie Est

ZA Fourchon

Canal de la Vallée Baux



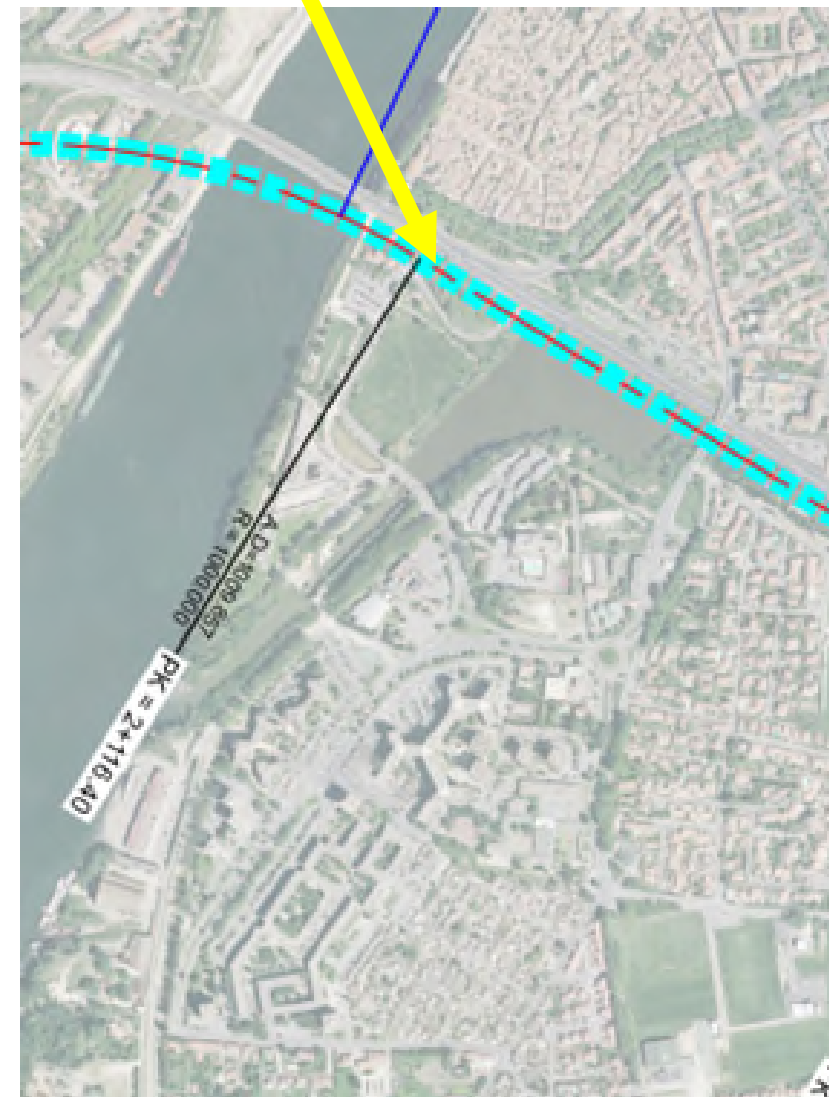
FAMILLE SOUS FLUVIALE COURTE et le CIRQUE ROMAIN D'ARLES



Le cirque représenté sur la maquette de l'Arles antique



Variante sous fluviale courte



Vestiges du cirque situé sur photographie aérienne d'Arles



C'est au sud-ouest de la cité, au bord du Rhône, qu'il fut édifié au II^e siècle. Il servait essentiellement aux courses de chevaux et de chars, mais aussi parfois à des combats de cavalerie et à des venationes, sorte de chasses à courre. Sa construction n'a pas dû être aisée. **Compte tenu de la nature instable du terrain, il du être édifié sur des milliers de pieux en bois.**(wikipédia)



www.egis-group.com

