



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



COUPLAGE DE L'OUTIL DE CALCUL D'ÉMISSION DE POLLUANTS *COPCEREMA* AVEC LE MODÈLE MULTIMODAL DE DÉPLACEMENTS (MMD) DE ROUEN

Rencontres de la Modélisation des Déplacements (RMD)

19-20 Mai 2025

Duy-Hung HA

Vincent DEMEULES

Lucas MONTBULEAU—GENTELET

Michaël SAVARY

Cerema Normandie-Centre

Contexte général

Projet conjoint Efficacity - Cerema

- Cadre du programme de recherche « Modélisations et Analyses Prospectives pour les trajectoires bas-carbone des territoires à l'horizon 2050 »
- Contrat de Recherche & Développement avec les collectivités territoriales
- Territoire d'expérimentation volontaire : Métropole Rouen Normandie parmi d'autres

Mission sur le volet « **Mobilité** » : *Appui technique pour l'amélioration de la modélisation des impacts des mobilités et la prise en compte des enjeux croisés avec d'autres thématiques*

- Couplage du nouveau modèle CopCerema avec le modèle multimodal de déplacements (MMD) de la MRN
- Implémentation au sein du MMD de nouveaux scénarios d'évolution de mobilités à l'horizon 2040/2050, compatibles avec les hypothèses SCOT/AEC

Disponibilité des outils sur le territoire : **MMD** (nouveau modèle de 2022) et **CopCerema** (nouvelles évolutions 2024)

Outils mobilisés



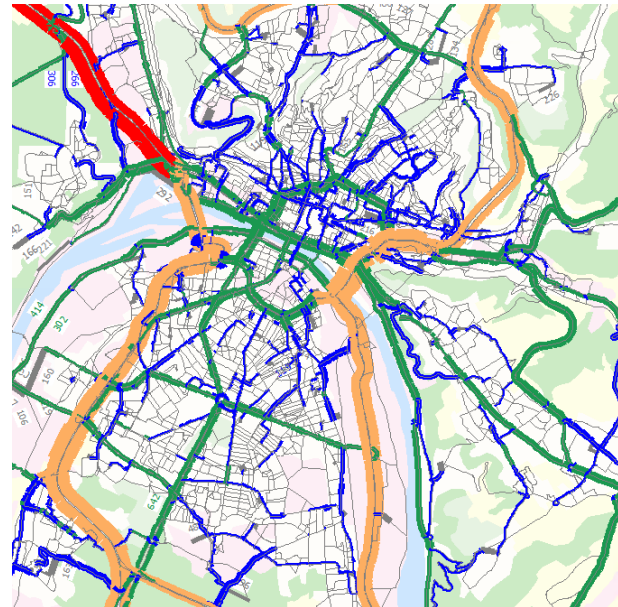
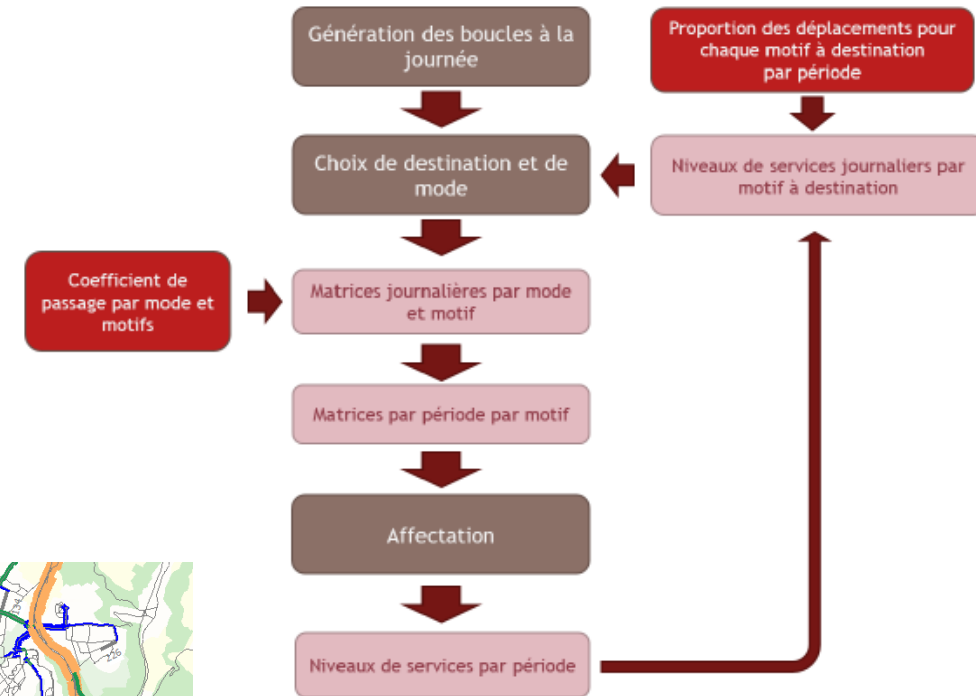
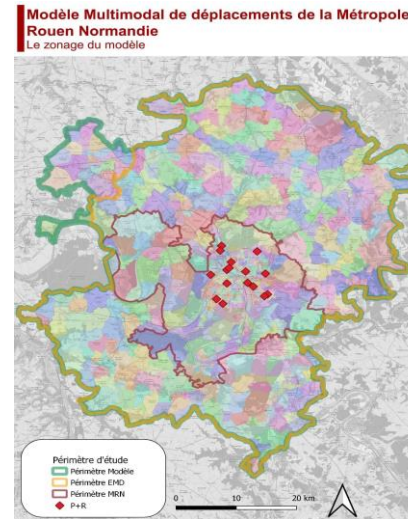
Quelques rappels sur le MMD de Rouen

Caractéristiques du modèle

- Modèle multimodal à 4 étapes
- Logiciel Cube (avec possibilité d'implémenter des scripts Python)
- Module ZFE-m « activable »
- Plusieurs scénarios de référence existants

Principales sorties du MMD

- Trafic VL, VUL, PL par tronçon et par période horaire (en particulier HPM, HPS)
- Vitesse moyenne sur tronçon



Outil CopCerema

Fonctionnalités principales

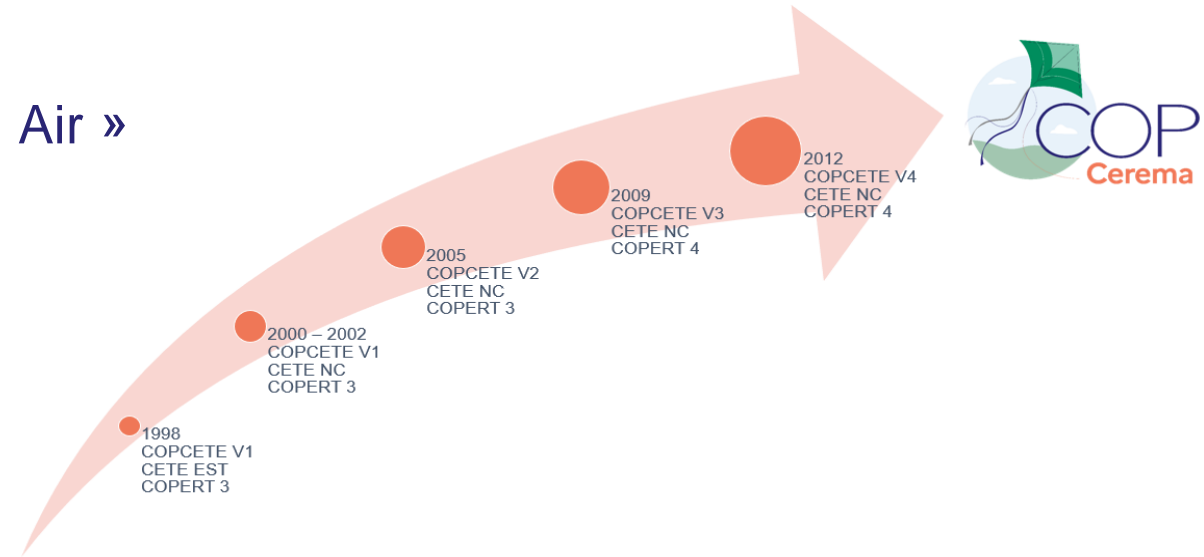
- Calcul des émissions polluantes du trafic
- Réponse aux besoins de calcul pour le volet « Air » dans les études d'impact

Evolutions récentes

- Nouvelle version en exécutable (sous Python)
- Mise à disposition gratuite
<https://www.cerema.fr/copcerema>

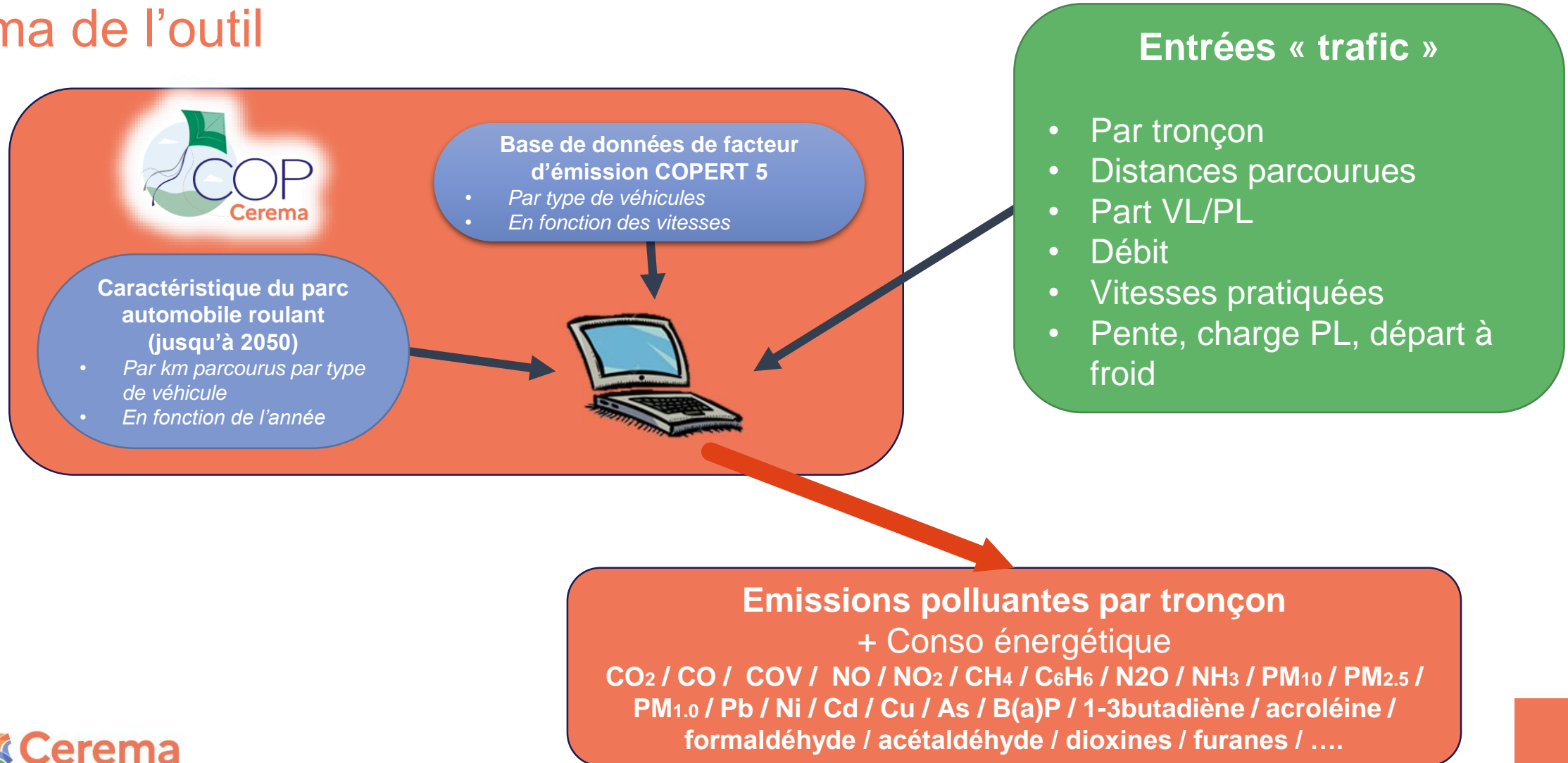
Méthodologie à la base

- Méthodologie européenne de référence de calcul des émissions du trafic routier basé sur la méthodologie COPERT (*Windows, gratuité, entrée/sortie en .csv ou .xlsx*)
- Limite : ***Pas adapté à un calcul par tronçon sur un réseau***



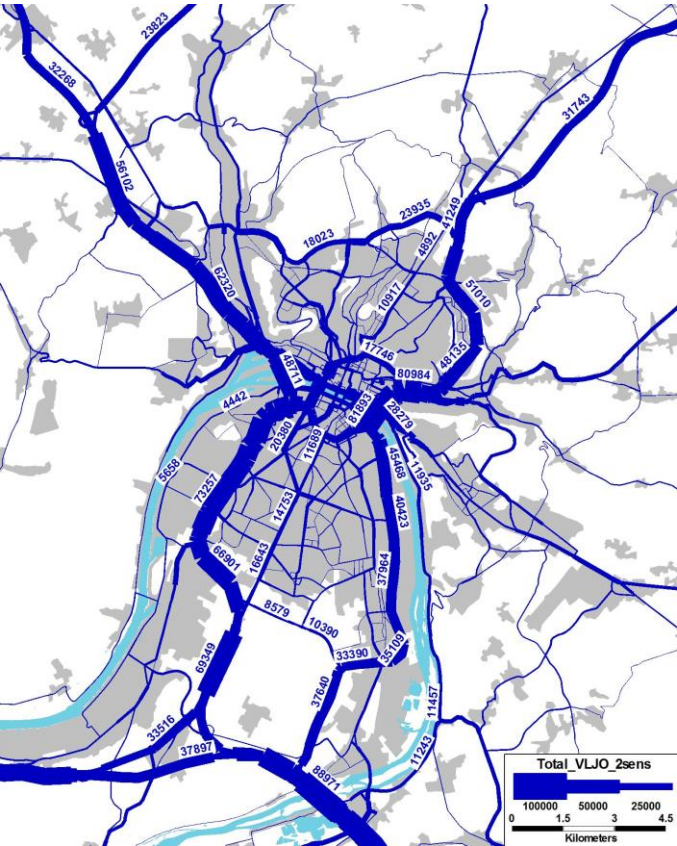
Nouvelle version de CopCerema

Schéma de l'outil



Nouvelle version de CopCerema

Comparaison entre Copert et CopCerema



COPERT
→

Urbain
Rural
Autoroute

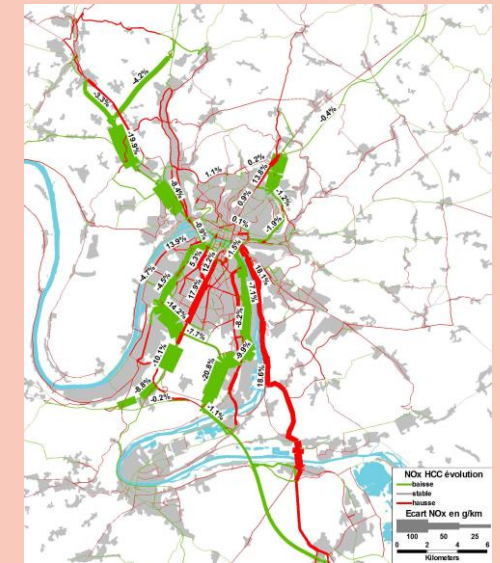
JO		
CO2 (t/h)	Nox (kg/h)	PM (kg/h)
2358,79	6610,10	109,19
1091,72	2976,13	49,34
569,65	1613,55	26,83

Résultat global part type de réseau
1 vitesse moy par type de réseau
vitesse VL = vitesse PL

COPCEREMA
→

Emission par tronçon (ou par sens)
1 vitesse VL / PL par tronçon (ou sens)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	Id	Type	Categorie	kilomètres	Energie (MJ)	Consommation	CO2 (g)	CO (g)	NOX (g)	NO2 (g)
1	ID45	Hot	PL Battery el	0,198947033	1,258871649	0	0	0	0	0
2	ID45	Hot	PL GNC	8,777819372	118,5400194	2469,583737	6774,845718	4,655772554	23,01057087	0,920422835
3	ID45	Hot	PL Diesel	990,9288018	8219,74946	194240,6474	610715,7035	668,7452052	2592,327642	285,1496956
4	ID45	Hot	PL Hydrogen	0,002924209	0,011885642	0	0	0	0	0
5	ID45	Hot	PL LNG	0,003277131	0,044255994	0,921999867	2,52933592	0,001738196	0,008590818	0,000343633
7	ID45	Hot	PL Essence	0,088230438	0,550299857	12,88636126	38,91549998	0,298879208	0,318482481	0,012739299
8	ID45	Hot	VUL Battery	4,383899039	11,09092826	0	0	0	0	0
9	ID45	Hot	VUL Diesel	985,621119	2586,414228	62177,85932	195494,4609	91,65951032	957,6933244	341,9066331
10	ID45	Hot	VUL Hydrog	0,007215899	0,011565969	0	0	0	0	0
11	ID45	Hot	VUL Essence	9,987766032	26,48331934	657,8773134	1982,376464	10,01470831	1,090940994	0,036285378
12	ID45	Hot	VP Battery e	4,047227847	23,01836292	0	0	0	0	0
13	ID45	Hot	VP GNC Bifu	0,065609131	0,166647317	3,77922222	10,28450078	0,013520771	0,002881269	8,1637E-05
14	ID45	Hot	VP Diesel	732,2581541	1516,365785	36619,07629	115134,6388	53,88004205	413,5444793	161,6006207
15	ID45	Hot	VP Diesel Ph	2,586871812	4,251250246	93,26232379	293,2275018	0,309403727	1,144056465	0,34321694
16	ID45	Hot	VP Hydrogen	0,00511534	0,005058583	0	0	0	0	0
17	ID45	Hot	VP GNC Bifu	3,160091095	7,001229601	162,3082267	490,7483004	0,7449127	0,150101727	0,007505086
18	ID45	Hot	VP Essence	244,4578079	534,8660178	13447,53619	40503,88483	134,771979	26,37854645	0,874165942
19	ID45	Hot	VP Essence	11,61514861	15,64970273	412,8023575	1241,282284	0,55311716	0,192866587	0,005785998
20	ID45	Hot	VP Essence	1,803974134	2,652511883	63,43893058	190,7499297	0,062975052	0,02097477	0,000629243
21	ID45	Cold	PL Battery el	0,198947033	0	0	0	0	0	0
22	ID45	Cold	PL GNC	8,777819372	0	0	0	0	0	0
23	ID45	Cold	PL Diesel	990,9288018	0	0	0	69,12009415	230,0809654	23,00809654
24	ID45	Cold	PL Hydrogen	0,002924209	0	0	0	0	0	0
25	ID45	Cold	PL LNG	0,003277131	0	0	0	0	0	0
26	ID45	Cold	PL Essence	0,088230438	0	0	0	0	0	0
27	ID45	Cold	VUL Battery	4,383899039	0	0	0	0	0	0
28	ID45	Cold	VUL Diesel	985,621119	97,36628782	2300,859761	7234,176815	7,166481973	20,0993729	7,611903278
29	ID45	Cold	VUL Hydrog	0,007215899	0	0	0	0	0	0
30	ID45	Cold	VUL Essence	9,987766032	1,768123115	41,40410528	125,0361856	5,449453908	0,120381091	0,004002088
31	ID45	Cold	VP Battery e	4,047227847	0	0	0	0	0	0



Outil CopCerema concrètement ?

Quelles sont les émissions calculées?

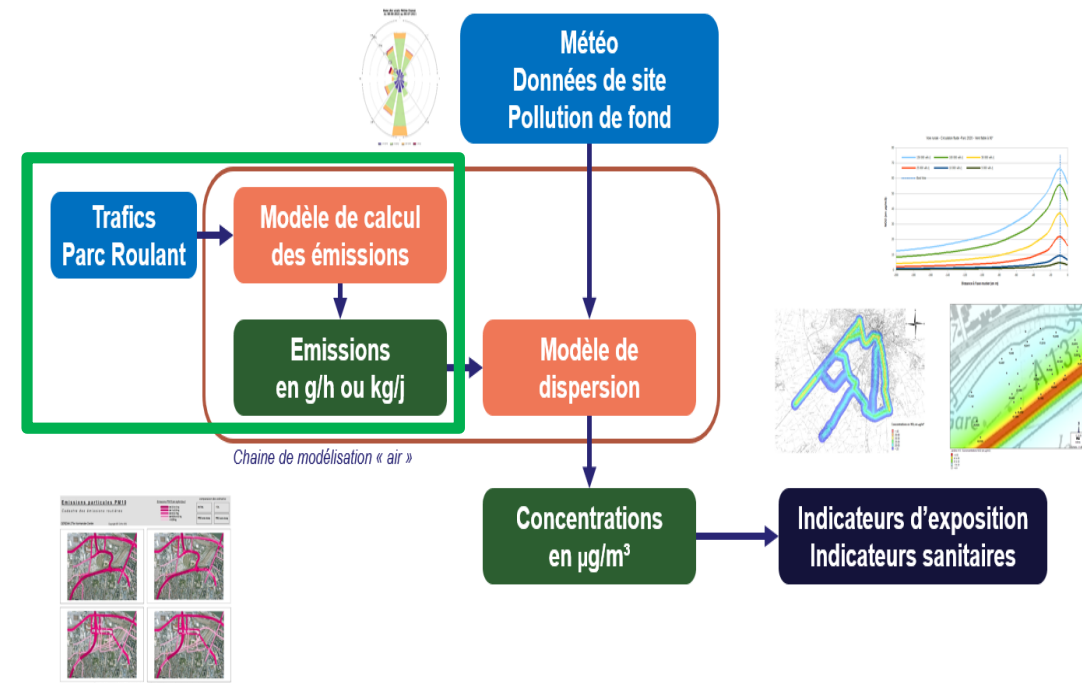
- Emissions à chaud
- Sur-émissions de démarrage à froid
- Emissions hors échappement (PM, métaux)

Caractéristiques spécifiques

- Corrections carburants (*~caractéristique, type (biocarburant)*)
- Parc national de l'UGE 2023 avec scénarios SNBC (AME-AMS) par défaut (*possibilité de simuler avec un parc personnalisé*)

Quelle utilisation ?

- Dans la chaîne de modélisation
 - ☐ idée de **simplification** en couplant la *modélisation de trafic* et la *modélisation des émissions*
- D'autres utilisations spécifiques : *CopCETU* dans les tunnels



Démarche méthodologique



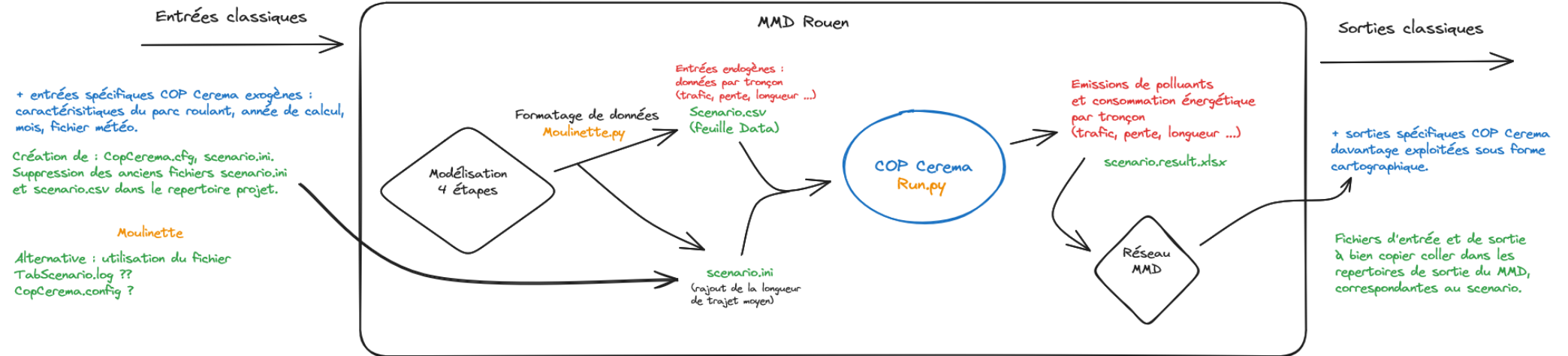
Couplage MMD-CopCerema

Fonctionnalités principales visées

- Limiter les interventions « humaines » en intégrant CopCerema dans la chaîne de calculs et l'interface du MMD (*module « activable »*)
- Utilisation directe des résultats de trafic & Exploitation directe des résultats d'émissions sur la même base SIG que le réseau du MMD
- Intégration et prise en compte simplifiée des mises à jour de l'outil CopCerema
- Transparence dans la codification de l'implémentation de la chaîne de calculs

Premières réflexions sur le couplage

Comment intégrer l'outil COP Cerema à l'intérieur du modèle de Rouen ?



Quelle arborescence ?

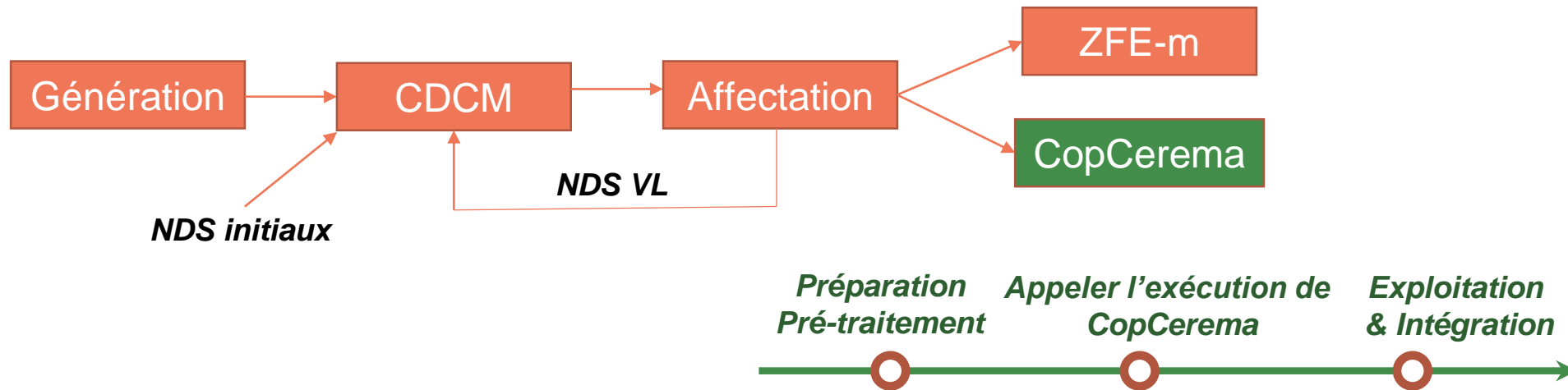
```

Modèle de Rouen
├── Ressources, outils ...
│   └── COP_Cerema
│       ├── Run.py
│       ├── .py
│       ├── .py
│       └── ...
└── Projet
    ├── CopCerema.cfg
    │   (nom du projet, format d'entrée et de sorti,
    │   détail, quitrin.)
    ├── scenario.ini
    │   (année, mois, parc, longueur
    │   de trajet moyen, meteo)
    ├── scenario.csv
    │   (par tronçon : id unique, longueur, pente, trafic ...)
    ├── scenario.result.xlsx
    ├── scenario.detail
    │   └── (4 fichiers résultats par tronçon)
    
```

Intégration du CopCerema dans le MMD

Schéma opérationnel

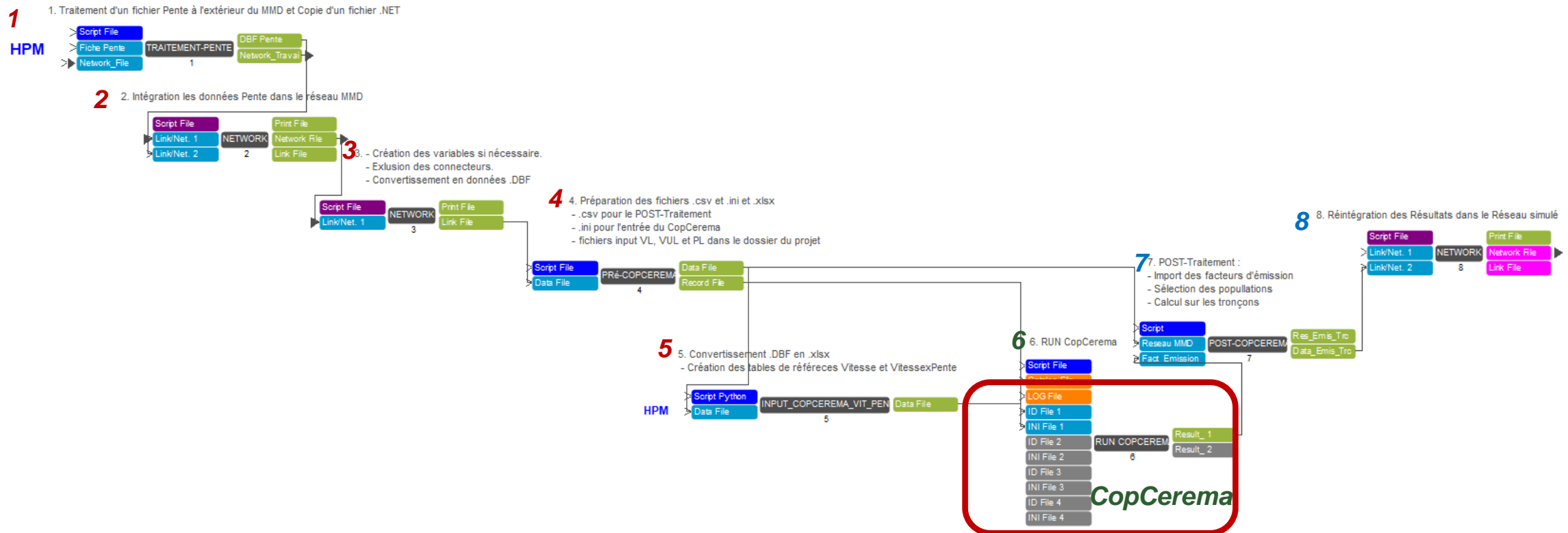
- Un module de calcul indépendant
- Exploitation directe des résultats d'affectation routière



Architecture informatique – implémentation dans MMD

Enchaînement des étapes

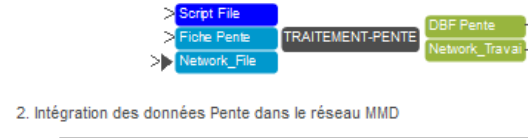
- 1-2. **Prise en compte** des informations sur la *pente des tronçons* (programme Python .py)
- 3. **Extraction** des résultats d'affectation (programme Cube .S)
- 4-5. **Préparation** des données d'entrée pour CopCerema (programme Python .py)
- 6. **Exécution** CopCerema sur les 3 périodes HPM, HPS et HCJ (programme Python .py)
- 7. **Exploitation** des résultats des émissions de polluants et **préparation** des données (programme Python .py)
- 8. **Réintégration** dans les résultats sur le réseau simulé (programme Cube .S)



Architecture informatique – implémentation dans MMD

HPM

1. Traitement d'un fichier Pente à l'extérieur du MMD et Copie d'un fichier .NET



2. Intégration des données Pente dans le réseau MMD



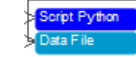
3. - Création des variables si nécessaire.
- Exclusion des connecteurs.
- Convertissement en données .DBF



4. Préparation des fichiers .csv et .ini et .xlsx
- .csv pour le POST-Traitement
- .ini pour l'entrée du CopCerema
- fichiers input VL, VUL et PL dans le dossier du projet



5. Convertissement .DBF en .xlsx
- Création des tables de références Vitesse et VitesseXpente



6. RUN CopCerema



A	B	A-B	NOM	LONGUEUR	PENTE	CLE_VUL	NBR_VL	VITESSE_VL	NBR_PL	VITESSE_PL	CHARGE_PL
1000	1023	1000-1023	TRONROUT0000000000116742	0,66204	0	0,1639	708,05	125	110,27	90	0,5
1002	1032	1002-1032	TRONROUT0000000000116614	0,82379	0	0,21966	96,45	67	0	67	0,5
1005	1026	1005-1026	TRONROUT0000000000116613	0,81194	0	0,02233	392,52	125	120,58	90	0,5
1007	1036	1007-1036	TRONROUT0000000000116498	0,67174	0	0,16727	92,8	63	15,33	63	0,5

(Extrait d'un fichier .DBF dans Cube)

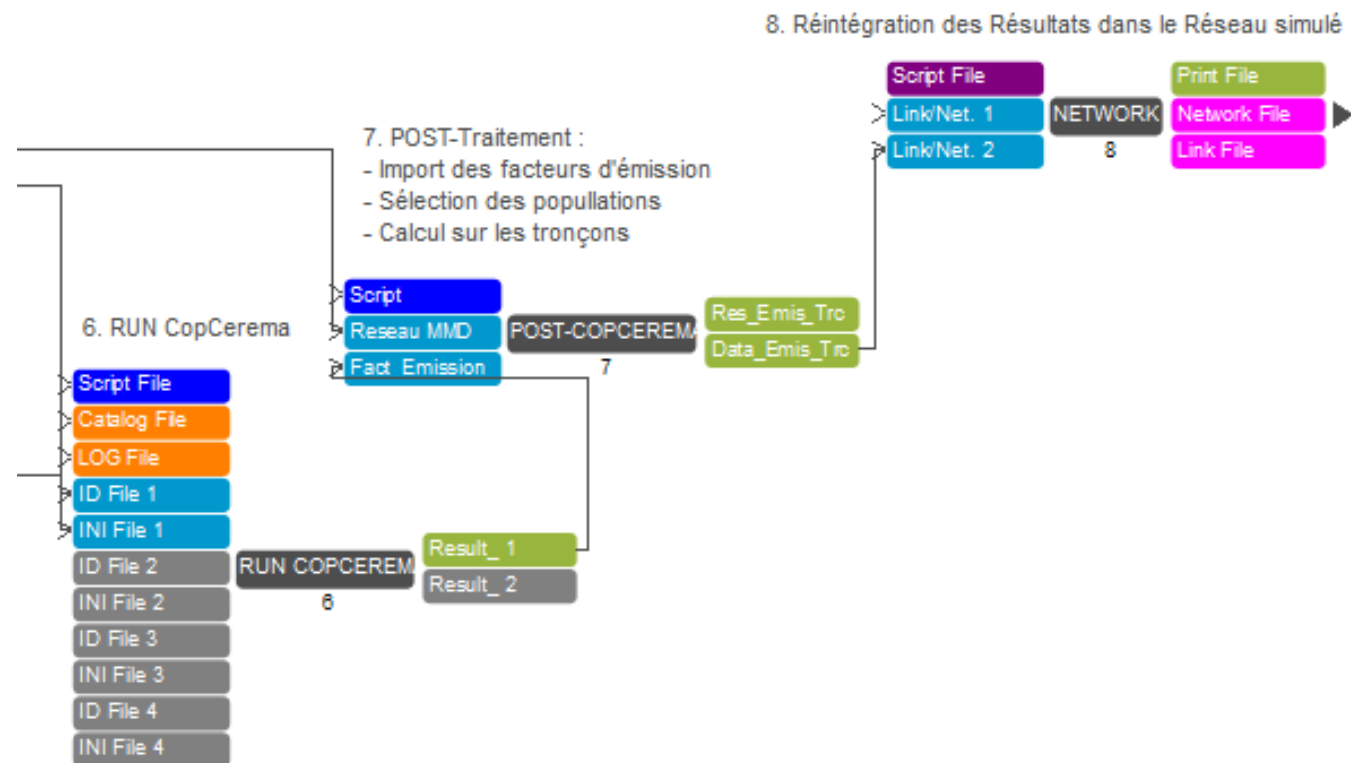
Pré-traitement

- Les connecteurs sont exclus (y compris ceux de P+R)
- La vitesse des PL est limitée à 90 km/h
- Variables prises par défaut : *Charge PL* = 50%
- Mise en forme des données d'entrée (*contrainte fichier .DBF*)
- Mise à disposition des fichiers par défaut

Architecture informatique – implémentation dans MMD

Post-traitement

- Sélection des émissions sur les polluants à analyser (ceux liés aux GES)
- Intégration dans le réseau affecté du MMD



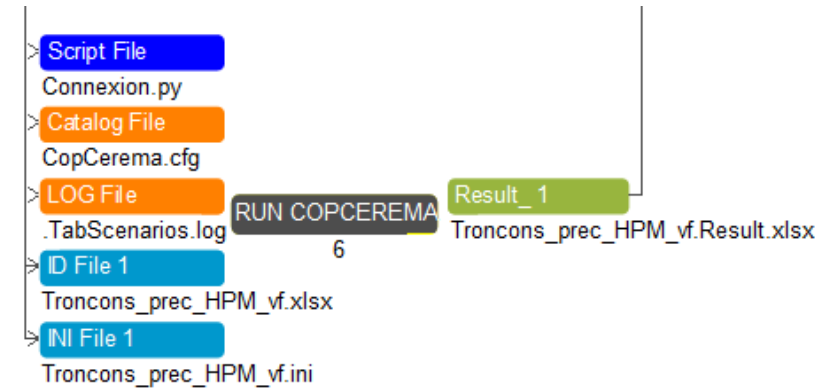
A-B	VHM	CO2_G	CO_G	CH4_G	A	B	ID
1000-1023	541,76	136080,7	193,1	3,91	1000	1023	TRONROUT000000000116742
1002-1032	79,45	12644,32	18,34	0,46	1002	1032	TRONROUT000000000116614
1005-1026	416,61	121295,82	156,26	4,87	1005	1026	TRONROUT000000000116613
1007-1036	72,64	17407,94	17,96	0,84	1007	1036	TRONROUT000000000116498

Implémentation – exemples de résultats

Run CopCerema

- Appel de fichier **.exe** ou **.bat**
- Les fichiers *catalog* (niveau outil) et *log* (niveau projet) sont accessibles et modifiables directement dans Cube

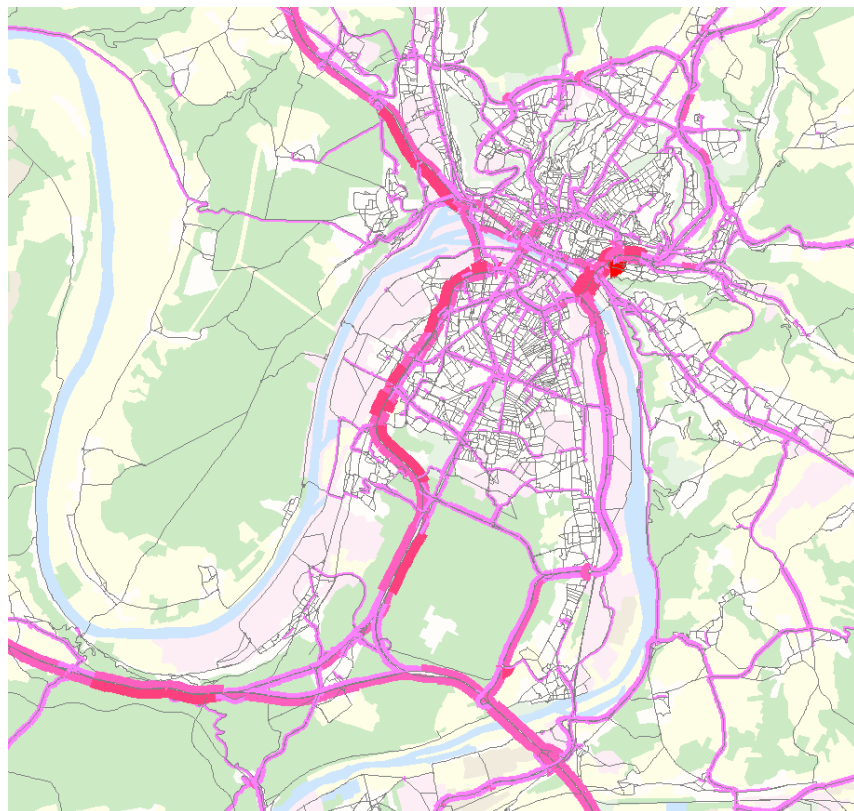
HPM



Conditions d'implémentation

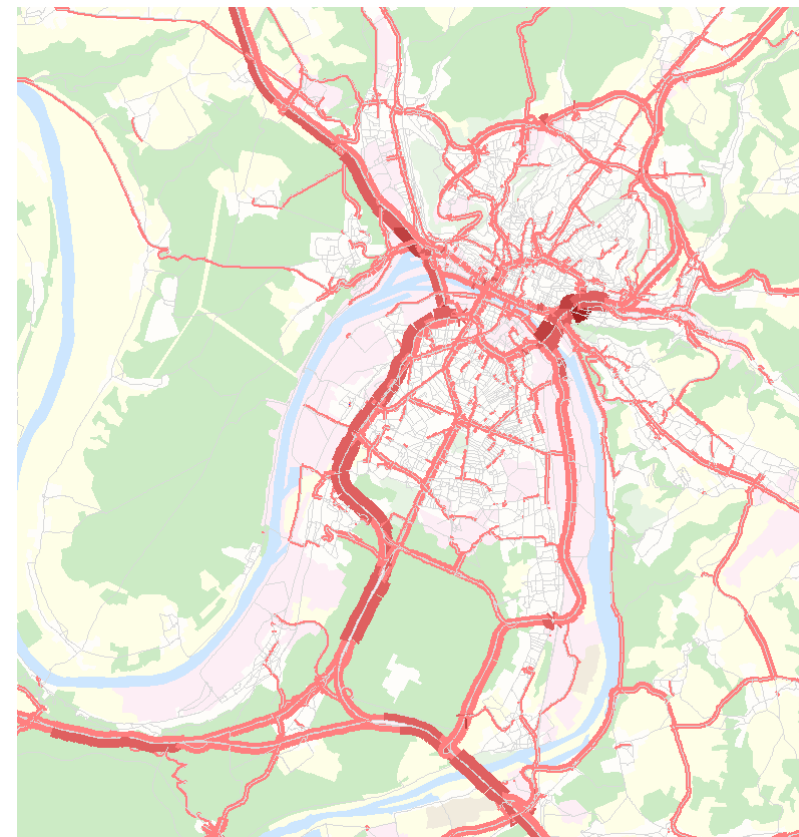
- Calcul initial sur les 56 000 tronçons originares du MMD bloqué. Test sur 14k tronçons a donné ~5h d'exécution □ une nouvelle approche est exigée
- Modification directe des fichiers de paramétrage dans Cube avant le lancement selon les scénarios
- Installation des modules Python complémentaires est nécessaire : *os*, *shutil*, *tables*, *simplifiedbf*, *openpyxl*, *dbf*

Illustrations dans le MMD des émissions



Emissions NOx en g/km

- NOX_VL_G_KM=668,963
- NOX_VL_G_KM=1337,926
- NOX_VL_G_KM <= 500
- NOX_VL_G_KM = 500 - 1000
- NOX_VL_G_KM = 1000 - 1500
- NOX_VL_G_KM = 1500 - 2000
- NOX_VL_G_KM > 2000



Emissions CO2 en g/km

- CO2_VL_G_KM=321603,125
- CO2_VL_G_KM=643206,25
- CO2_VL_G_KM <= 300000
- CO2_VL_G_KM = 300000 - 600000
- CO2_VL_G_KM = 600000 - 900000
- CO2_VL_G_KM = 900000 - 1200000
- CO2_VL_G_KM > 1200000

Conclusions et Perspectives

Retour d'expérience

- Possibilité d'intégrer pleinement et de façon transparente le module dans un modèle de trafic sans passer par l'interface de CopCerema
- Nouvelle approche de calcul a été nécessaire pour surmonter le problème de temps de calcul important à la base □ calcul selon les classes de vitesses au lieu de selon les tronçons directement
- Avantages du couplage CopCerema / Modèle Trafic :
 - Profiter de la gestion des scénarios du modèle
 - Profiter de l'environnement cartographique du modèle

Perspectives

- Analyse de convergence des outils MMD-CopCerema/Atmo Normandie
 - Analyse comparative des parcs roulants utilisés/personnalisés
 - Analyse comparative des résultats
- Analyse thématique et production de bilan agrégé
- Indicateurs agrégés et pilotés dans un tableau de bord



Merci de votre attention