

Examen final du cours de circulation CIV4740

Nicolas Saunier
nicolas.saunier@polymtl.ca

20 avril 2016

Notez le barème et le temps indicatif à consacrer à chaque exercice. Veuillez indiquer clairement les numéros des questions que vous traitez et vos réponses correspondantes (et souligner ou encadrer les résultats numériques). Apportez une attention particulière à la rédaction et à la définition des notations que vous employez.

Seules deux feuilles personnelles de notes recto-verso sont permises. Des tables statistiques sont incluses à la fin de l'énoncé.

Question 1

45 min (/6)

On considère un carrefour isolé de deux rues à sens unique, dont la demande de pointe projetée est estimée à 1600 uvp/h pour l'axe est-ouest et 900 uvp/h pour l'axe nord-sud. On suppose qu'il n'y a pas de mouvements tournants et que les débits de saturation respectifs pour les axes est-ouest et nord-sud sont 1850 uvp/h et 1800 uvp/h. En faisant des hypothèses raisonnables sur la durée des phases de jaune et de rouge intégral,

1. déterminer le nombre de voies nécessaires, la durée du cycle optimal et le diagramme des feux (avec les durées de chaque phase);
2. en déduire le retard moyen et le niveau de service par approche et pour l'ensemble du carrefour (voir Tableau 2 à la fin).

Solution

1. Si on ne considère pas de mouvements tournants, on propose un plan de feux en deux phases, une pour chaque axe. Il est clair qu'une seule voie par axe n'est pas suffisante pour répondre à la demande sur ce carrefour (charge globale de 1.35). Le carrefour pourrait fonctionner (degré de saturation inférieur à 1) avec deux voies seulement pour l'axe est-ouest, mais on préfère avoir deux voies aussi sur l'axe nord-sud pour diminuer les retards. La charge globale du carrefour est alors de $1600/(2 \times 1850) + 900/(2 \times 1800) = 0.43 + 0.25 = 0.68$.

En absence d'indication, on suppose un temps de jaune de 3 s, un temps de rouge intégral de 1 s, et un temps perdu par phase de 4 s par phase (2 s au début du vert, 2 s de jaune utile). On calcule alors le cycle optimal avec la formule de Webster, soit $(1.5 \times 8 + 5)/(1 - 0.68) = 53.1 \approx 53$ s. Il y a donc $53 - 8 = 45$ s de temps de vert utile disponible à allouer pour chaque phase, soit 28 s pour l'axe est-ouest et 17 s pour l'axe nord-sud, qui correspondent aussi aux temps de vert affichés respectifs.

2. On calcule les degrés de saturation, les retards uniforme et incrémental moyens (par véhicule) pour l'approche 1 (axe est-ouest), soit respectivement 0.82, 10.4 s et 8.1 s : le retard moyen total est donc 18.5 s et le niveau de service B. De la

même façon, le degré de saturation, les retards uniforme et incrémental moyen (par véhicule) pour l'approche 2 (axe nord-sud) sont respectivement 0.78, 16.3 s et 10.7 s : le retard moyen total est donc 27.0 s et le niveau de service C.

On en déduit le retard moyen sur le carrefour (en pondérant par les débit de chaque approche) $\frac{1600 \times 18.5 + 900 \times 27.0}{1600 + 900} = 21.6$ s, soit un niveau de service de C pour l'ensemble du carrefour.

Question 2

45 min (/6)

On considère un corridor de trois carrefours à feux de cycle commun 45 s avec les caractéristiques suivantes :

Numéro du carrefour	Distance au carrefour 1 (m)	Durée de rouge utile (s)
1	0	22
2	200	21
3	350	23

La vitesse moyenne libre des véhicules est 50 km/h.

1. Proposer une coordination des feux dans le sens de circulation du carrefour 1 vers 3 en absence de file d'attente aux feux (en calculant les décalages), calculer l'efficacité de la bande, tracer le diagramme espace-temps et l'onde de coordination.
2. Quelle est l'efficacité de la bande dans l'autre sens de circulation (du carrefour 3 vers 1) en considérant la même vitesse moyenne libre ?
3. En tenant compte du temps de démarrage initial et de l'existence de files d'attente de 2 véhicules par cycle à chaque feu pour le sens de circulation du carrefour 1 vers 3, calculer les nouveaux décalages et l'efficacité de la bande (sur tout le corridor, dans le sens de circulation du carrefour 1 vers 3).

Solution

1. Les décalages entre les carrefours 1 et 2 et entre les carrefours 2 et 3 sont respectivement $200 \times 3.6/50 = 14.4$ s et $150 \times 3.6/50 = 10.8$ s. La bande passante est le temps de vert utile minimal, soit 22 s pour le 3ème carrefour. L'efficacité de la bande est finalement $22/45 = 0.49$, soit 49 %.
2. En considérant la même vitesse libre, il faut chercher graphiquement la bande la plus large (avec le décalage calculé à la question précédente). Les véhicules partant du carrefour 3 arrivent au carrefour 2 à l'instant 36 s et le rouge du carrefour 2 commence à 38.4 s. Il reste donc 2.4 s de bande passante et $2.4/45 = 0.05$.
3. Les nouveaux décalages entre les carrefours 1 et 2 et entre les carrefours 2 et 3 sont respectivement $\theta_{1,2} = d_{1,2}/v - n/s - t_{p,dem} = 14.4 - 4 - 2 = 8.4$ s ($d_{i,j}$ distance entre les carrefours i et j , v vitesse moyenne libre des véhicules, n nombre de véhicules en attente au début du vert, $1/s$ temps inter-véhiculaire minimal (valeur par défaut de 2 s) et $t_{p,dem}$ temps perdu au démarrage (choisi égal à 2 s) et $\theta_{2,3} = d_{2,3}/v - n/s = 10.8 - 4 = 6.8$ s
Le temps de vert utile restant pour la bande (en suivant le véhicule passé en premier au premier carrefour) est toujours limité par le 3ème carrefour et est de 12 s, soit une efficacité de $12/45 = 0.27$.

Question 3

25 min (/3.5)

Le nombre de places disponibles dans un parc de stationnement est relevé par intervalle de 5 min (fichier `stationnements-libres.csv` sur moodle). En utilisant le test statistique approprié, établir si le nombre de places disponibles par intervalle de 5 min suit la loi de Poisson. Estimer la probabilité qu'un conducteur puisse se stationner dans un intervalle de 5 min.

Solution Il faut compter le nombre d'observations des valeurs prises par la variable aléatoire entière X "nombre de places de stationnement disponibles par intervalle de 5 min". La moyenne empirique de X est 4.131 places de stationnement disponibles. On calcule ensuite le nombre d'observations attendues si la variables suivait la loi de Poisson (voir tableau ci-dessous).

Nombre de places disponibles	Nombre d'intervalles de 5 min	Nombre d'intervalles de 5 min (théoriques)
0	14	16.1
1	61	66.4
2	147	137.1
3	198	188.8
4	206	195.0
5	142	161.1
6	107	110.9
7	56	65.4
8	34	33.8
9	19	15.5
10	9	6.4
11 et +	7	3.6

L'hypothèse nulle est que X suit la loi de Poisson. La statistique du test est $X^2 = 11.28$ et la valeur seuil pour la loi du χ^2 à 10 degrés de liberté est 15.98 pour 10 % (la probabilité qu'une variable aléatoire suivant la loi du χ^2 à 10 degrés de liberté soit inférieure ou égale X^2 est 0.66). On ne peut donc pas rejeter l'hypothèse nulle (risque de première espèce trop important) que le nombre de places de stationnement disponible suit la loi de Poisson.

La probabilité de trouver une place pour stationner dans un intervalle de 5 min est $1 - P(X = 0) = 1 - e^{-4.131} = 0.98$.

Question 4

20 min (/2.5)

Dans le fichier de relevé de comptage et de relevé de vitesses individuelles mis à disposition sur moodle (fichier `releve-vitesse.csv`).

1. Calculer la moyenne des vitesses et son intervalle de confiance à 95 % et 90 %.
2. Après l'ajout d'un dos d'âne, 5000 nouvelles mesures sont effectuées et la nouvelle vitesse moyenne est maintenant 48.0 km/h avec un écart-type de 8.0 km/h : calculer l'intervalle de confiance de la vitesse moyenne à 95 % et 99 %, et conclure quant à l'effet de la mesure d'apaisement de la circulation.

Solution

1. La moyenne empirique des vitesses est 50.75 km/h. Les intervalles de confiance de la moyenne de la vitesse à 95 % et 90 % sont respectivement [50.48, 51.01] et [50.53, 50.97].

2. Les intervalles de confiance de la moyenne de la vitesse après l'ajout du dos d'âne à 99 % et 95 % sont respectivement $[(47.78, 48.22)]$ et $[47.71, 48.29]$. On voit que les intervalles de confiance à 95 % avant et après l'ajout du dos d'âne sont disjoints, ce qui indique que le dos d'âne a eu un effet sur la vitesse.

Ce n'était pas demandé, mais on peut aussi faire le test statistique sur les moyennes. L'hypothèse nulle est que les moyennes sont identiques avant et après et l'alternative est que la vitesse a baissé. La statistique du test est

$$Z_0 = \frac{48.00 - 50.75}{\sqrt{\frac{9.39^2}{4799} + \frac{8.00^2}{5000}}} = -15.58$$

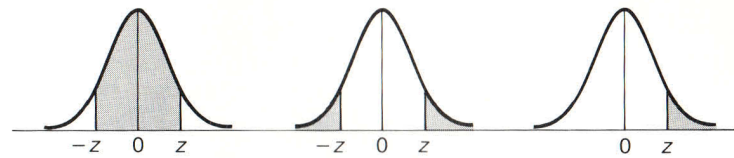
Sous l'hypothèse nulle, la statistique suit la loi normale (plus de 30 observations avant et après), et la probabilité qu'une variable aléatoire suivant la loi normale soit inférieure à Z_0 est de l'ordre de 10^{-55} . On peut donc rejeter l'hypothèse nulle et conclure que la mesure d'apaisement de la circulation a effectivement fait baisser les vitesses.

Question 5

15 min (/2)

En faisant des hypothèses sur la capacité, la vitesse maximale sur une autoroute québécoise et la taille moyenne des véhicules, calculer le pourcentage de la longueur d'une autoroute occupée par des véhicules. Commenter. Comment les véhicules autonomes (sans conducteurs) peuvent-ils améliorer la situation ?

Solution La limite de vitesse sur les autoroutes québécoises est 100 km/h. La capacité d'une voie d'autoroute est environ 2000 véh/h. Selon la relation fondamentale, la densité est alors $2000/100 = 20$ véh/km. En considérant une longueur moyenne de 6 m par véhicule, on obtient que 120 m d'autoroute est occupé par des véhicules pour chaque km, soit 12 % de longueur occupée. Une autoroute à capacité est donc actuellement très largement vide, à cause des capacités physiques et cognitives des conducteurs qui imposent des marges de sécurité entre eux. Les véhicules autonomes, avec leurs capacités physiques et cognitives supérieures (temps de perception-réaction quasi-nul) pourront augmenter de façon importante la capacité des autoroutes (de toutes les routes) en raccourcissant la distance entre les véhicules.

**Table 1B**

**Critical values for the
standard normal
distribution**

CONFIDENCE INTERVALS $P(Z \leq z)$	TWO-SIDED TESTS $P(Z \geq z)$	ONE-SIDED TESTS $P(Z \geq z)$	CRITICAL VALUE z
.10	.90	.45	.126
.20	.80	.40	.253
.30	.70	.35	.385
.40	.60	.30	.524
.50	.50	.25	.674
.60	.40	.20	.842
.70	.30	.15	1.036
.80	.20	.10	1.282
.90	.10	.05	1.645
.95	.05	.025	1.960
.98	.02	.01	2.326
.99	.01	.005	2.576
.995	.005	.0025	2.807
.999	.001	.0005	3.290
.9995	.0005	.00025	3.480
.9999	.0001	.00005	3.890
.99999	.00001	.000005	4.420
.999999	.0000001	.00000005	4.900

Source: D. B. Owen and D. T. Monk, *Tables of the Normal Probability Integral*, Sandia Corporation Technical Memo 64-57-51 (March 1957).

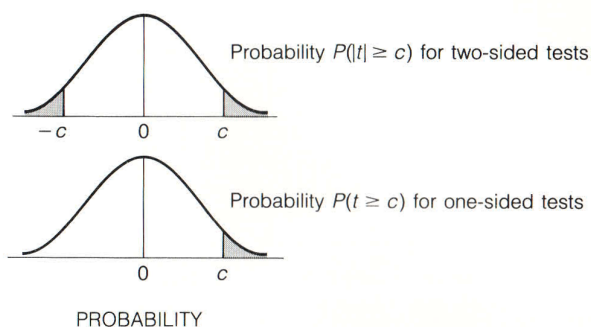
	0.995	0.99	0.975	0.95	0.9	0.75	0.5	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005
1	3.927e-05	0.0001571	0.0009821	0.003932	0.01579	0.1015	0.4549	1.323	2.706	3.841	5.024	6.635	7.879
2	0.01003	0.0201	0.05064	0.1026	0.2107	0.5754	1.386	2.773	4.605	5.991	7.378	9.21	10.6
3	0.07172	0.1148	0.2158	0.3518	0.5844	1.213	2.366	4.108	6.251	7.815	9.348	11.34	12.84
4	0.207	0.2971	0.4844	0.7107	1.064	1.923	3.357	5.385	7.779	9.488	11.14	13.28	14.86
5	0.4117	0.5543	0.8312	1.145	1.61	2.675	4.351	6.626	9.236	11.07	12.83	15.09	16.75
6	0.6757	0.8721	1.237	1.635	2.204	3.455	5.348	7.841	10.64	12.59	14.45	16.81	18.55
7	0.9893	1.239	1.69	2.167	2.833	4.255	6.346	9.037	12.02	14.07	16.01	18.48	20.28
8	1.344	1.646	2.18	2.733	3.49	5.071	7.344	10.22	13.36	15.51	17.53	20.09	21.95
9	1.735	2.088	2.7	3.325	4.168	5.899	8.343	11.39	14.68	16.92	19.02	21.67	23.59
10	2.156	2.558	3.247	3.94	4.865	6.737	9.342	12.55	15.99	18.31	20.48	23.21	25.19
11	2.603	3.053	3.816	4.575	5.578	7.584	10.34	13.7	17.28	19.68	21.92	24.72	26.76
12	3.074	3.571	4.404	5.226	6.304	8.438	11.34	14.85	18.55	21.03	23.34	26.22	28.3
13	3.565	4.107	5.009	5.892	7.042	9.299	12.34	15.98	19.81	22.36	24.74	27.69	29.82
14	4.075	4.66	5.629	6.571	7.79	10.17	13.34	17.12	21.06	23.68	26.12	29.14	31.32
15	4.601	5.229	6.262	7.261	8.547	11.04	14.34	18.25	22.31	25	27.49	30.58	32.8
16	5.142	5.812	6.908	7.962	9.312	11.91	15.34	19.37	23.54	26.3	28.85	32	34.27
17	5.697	6.408	7.564	8.672	10.09	12.79	16.34	20.49	24.77	27.59	30.19	33.41	35.72
18	6.265	7.015	8.231	9.39	10.86	13.68	17.34	21.6	25.99	28.87	31.53	34.81	37.16
19	6.844	7.633	8.907	10.12	11.65	14.56	18.34	22.72	27.2	30.14	32.85	36.19	38.58
20	7.434	8.26	9.591	10.85	12.44	15.45	19.34	23.83	28.41	31.41	34.17	37.57	40
21	8.034	8.897	10.28	11.59	13.24	16.34	20.34	24.93	29.62	32.67	35.48	38.93	41.4
22	8.643	9.542	10.98	12.34	14.04	17.24	21.34	26.04	30.81	33.92	36.78	40.29	42.8
23	9.26	10.2	11.69	13.09	14.85	18.14	22.34	27.14	32.01	35.17	38.08	41.64	44.18
24	9.886	10.86	12.4	13.85	15.66	19.04	23.34	28.24	33.2	36.42	39.36	42.98	45.56
25	10.52	11.52	13.12	14.61	16.47	19.94	24.34	29.34	34.38	37.65	40.65	44.31	46.93
26	11.16	12.2	13.84	15.38	17.29	20.84	25.34	30.43	35.56	38.89	41.92	45.64	48.29
27	11.81	12.88	14.57	16.15	18.11	21.75	26.34	31.53	36.74	40.11	43.19	46.96	49.64
28	12.46	13.56	15.31	16.93	18.94	22.66	27.34	32.62	37.92	41.34	44.46	48.28	50.99
29	13.12	14.26	16.05	17.71	19.77	23.57	28.34	33.71	39.09	42.56	45.72	49.59	52.34
30	13.79	14.95	16.79	18.49	20.6	24.48	29.34	34.8	40.26	43.77	46.98	50.89	53.67

TABLE 1 – Table de la loi du χ^2 : les lignes correspondent au nombre de degrés de liberté (indiqué dans la première colonne), les colonnes au risque de faire une erreur de type I (indiqué sur la première ligne) et le risque de première espèce est la probabilité qu'une variable aléatoire X suivant la loi du χ^2 à d degré de liberté soit supérieure à la valeur correspondante dans le tableau.

NS	Retard moyen par véhicule (s/véh)
A	< 10
B	$]10, 20]$
C	$]20, 35]$
D	$]35, 55]$
E	$]55, 80]$
F	> 80

TABLE 2 – Niveau de service pour un carrefour

Table 3
Critical values for
Student's *t* distribution



	.50	.20	.10	.05	.02	.01	.005	.002	.001	TWO-SIDED TESTS
ν	.25	.10	.05	.025	.01	.005	.0025	.001	.0005	ONE-SIDED TESTS
1	1.000	3.078	6.314	12.706	31.821	63.637	127.32	318.31	636.62	
2	.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	14.089	22.326	31.598	
3	.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	7.453	10.213	12.924	
4	.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	5.598	7.173	8.610	
5	.727	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	4.773	5.893	6.869	
6	.718	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	4.317	5.208	5.959	
7	.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.020	4.785	5.408	
8	.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	3.833	4.501	5.041	
9	.703	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	3.690	4.297	4.781	
10	.700	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	3.581	4.144	4.537	
11	.697	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	3.497	4.025	4.437	
12	.695	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.428	3.930	4.318	
13	.694	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.372	3.852	4.221	
14	.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.326	3.787	4.140	
15	.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.286	3.733	4.073	
16	.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.252	3.686	4.015	
17	.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.222	3.646	3.965	
18	.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.197	3.610	3.922	
19	.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.174	3.579	3.883	
20	.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.153	3.552	3.850	
21	.686	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.135	3.257	3.189	
22	.686	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.119	3.505	3.792	
23	.685	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.104	3.485	3.767	
24	.685	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.091	3.467	3.745	
25	.684	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.078	3.450	3.725	
26	.684	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.067	3.435	3.707	
27	.684	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.057	3.421	3.690	
28	.683	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.047	3.408	3.674	
29	.683	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.038	3.396	3.659	
30	.683	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.030	3.385	3.646	
40	.681	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	2.971	3.307	3.551	
60	.679	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	2.915	3.232	3.460	