



IMT Atlantique

Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

Réduction de la Latence et de la Gigue dans le Réseau d'Accès Radio 5G

Soutenance de Thèse de Doctorat
13 Décembre 2022, Rennes
Flavien Ronteix--Jacquet

- Directeur de thèse : Pr. Xavier **Lagrange**, professeur, IMT Atlantique
- Encadrants de thèse : Alexandre **Ferrieux**, ingénieur, Orange Innovation
Isabelle **Hamchaoui**, ingénieure, Orange Innovation
- Rapporteurs : Pr. Philippe **Martins**, professeur, Télécom ParisTech
Thierry **Turletti**, directeur de recherche, INRIA
- Examineurs : Pr. André-Luc **Beylot**, professeur d'université, ENSEEIHT/IRIT
Cédric **Adjih**, chargé de recherche, INRIA
- Invité : Stéphane **Tuffin**, ingénieur, Orange Innovation



IMT Atlantique

Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

DOCTORAT

BRETAGNE

LOIRE / MATHSTIC



Contexte

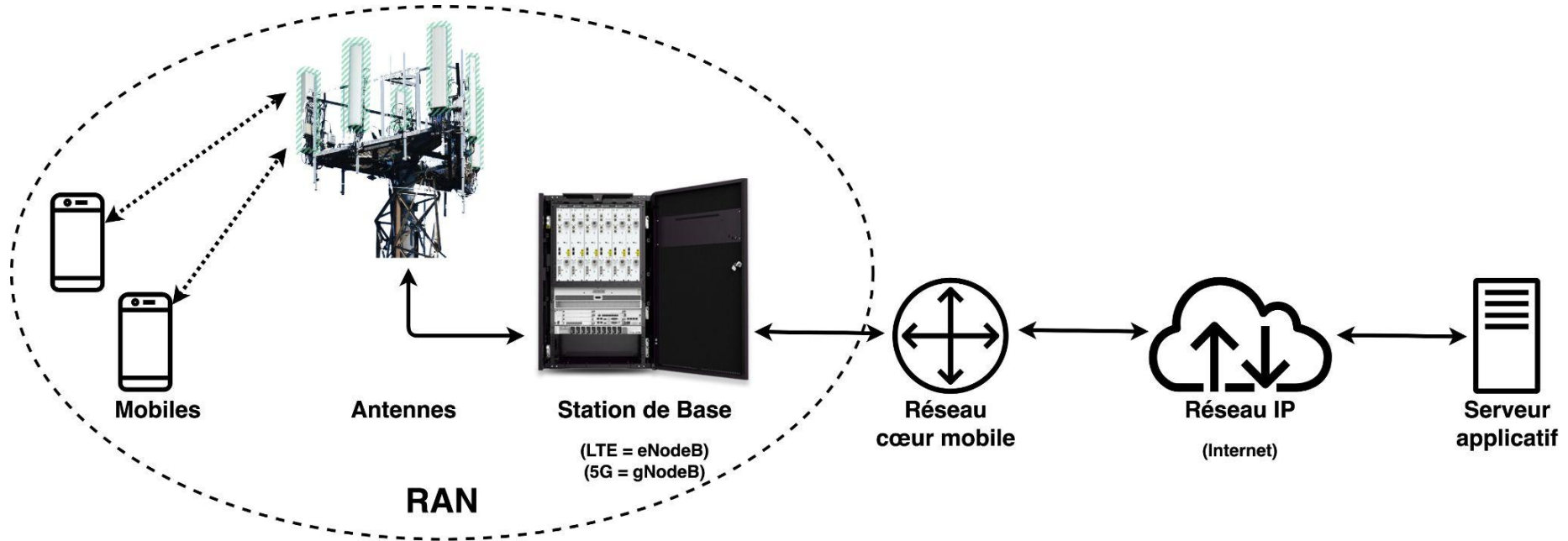


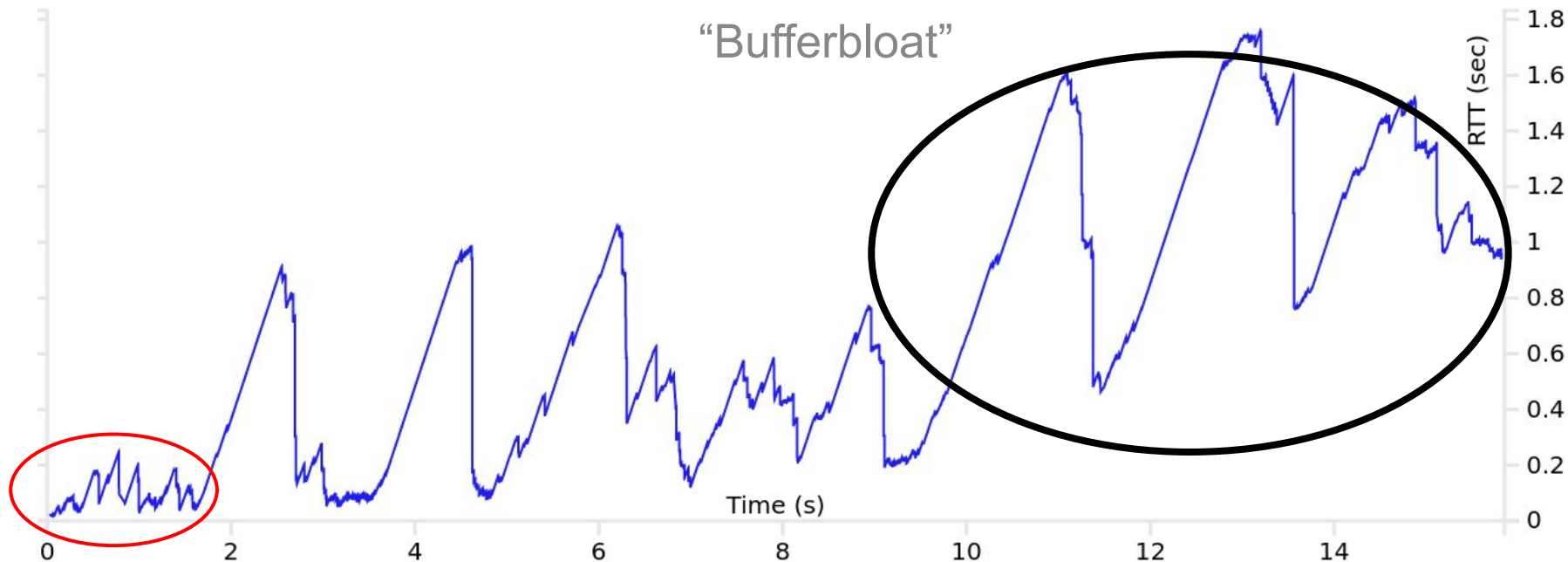
IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

Gaming, cloud computing, réalité augmentée : Qualité d'expérience impactée par la latence et la gigue

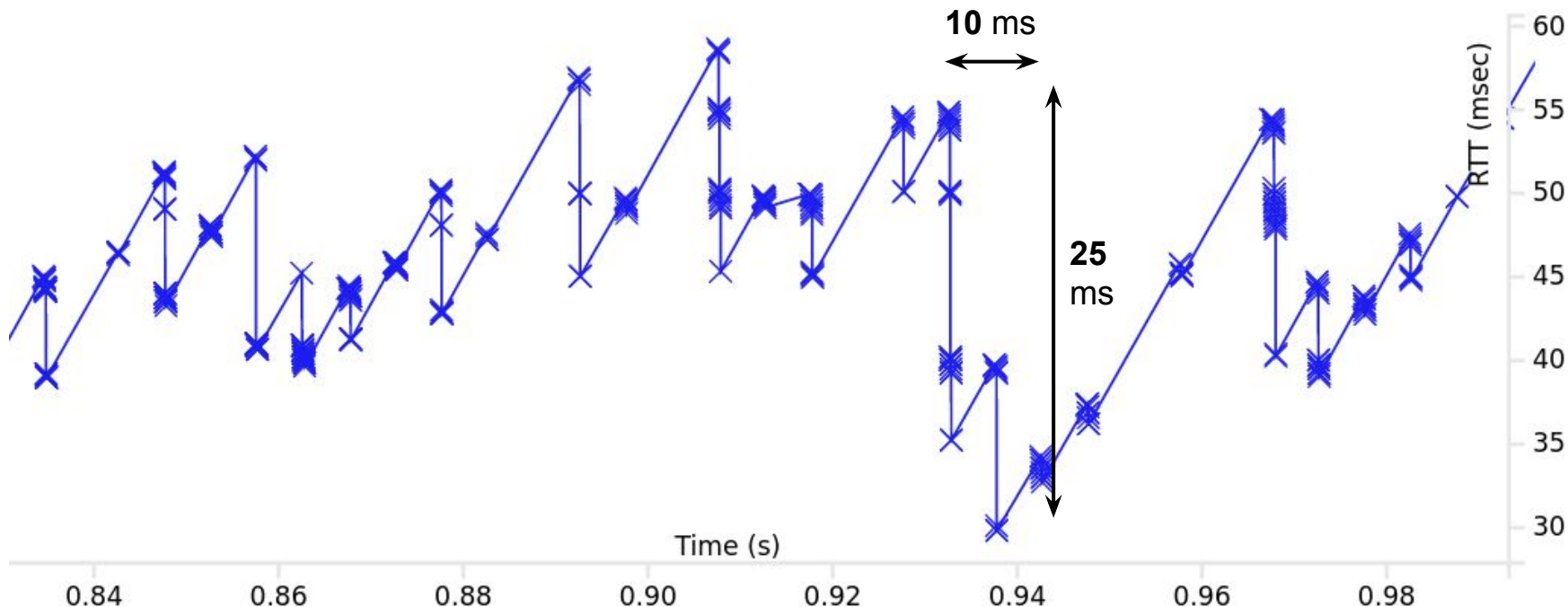
Trafic internet basé sur le protocole TCP (ou Quic) : Réduction du débit







Évolution du RTT pour un trafic TCP dans un réseau de production 4G/LTE



Réduction de la *latence* et de la *gigue* introduites par le *réseau d'accès* cellulaire, 4G et 5G, pour le trafic Internet



Méthode expérimentale basée sur un RAN de laboratoire

LatSeq, proposition d'une **méthode de mesure** des latences internes

Étude de la latence de la voie montante

Enhanced-BSR, proposition d'une **amélioration de la méthode d'accès** de la voie montante



Méthode Expérimentale



IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

Étude des latences dues aux RAN

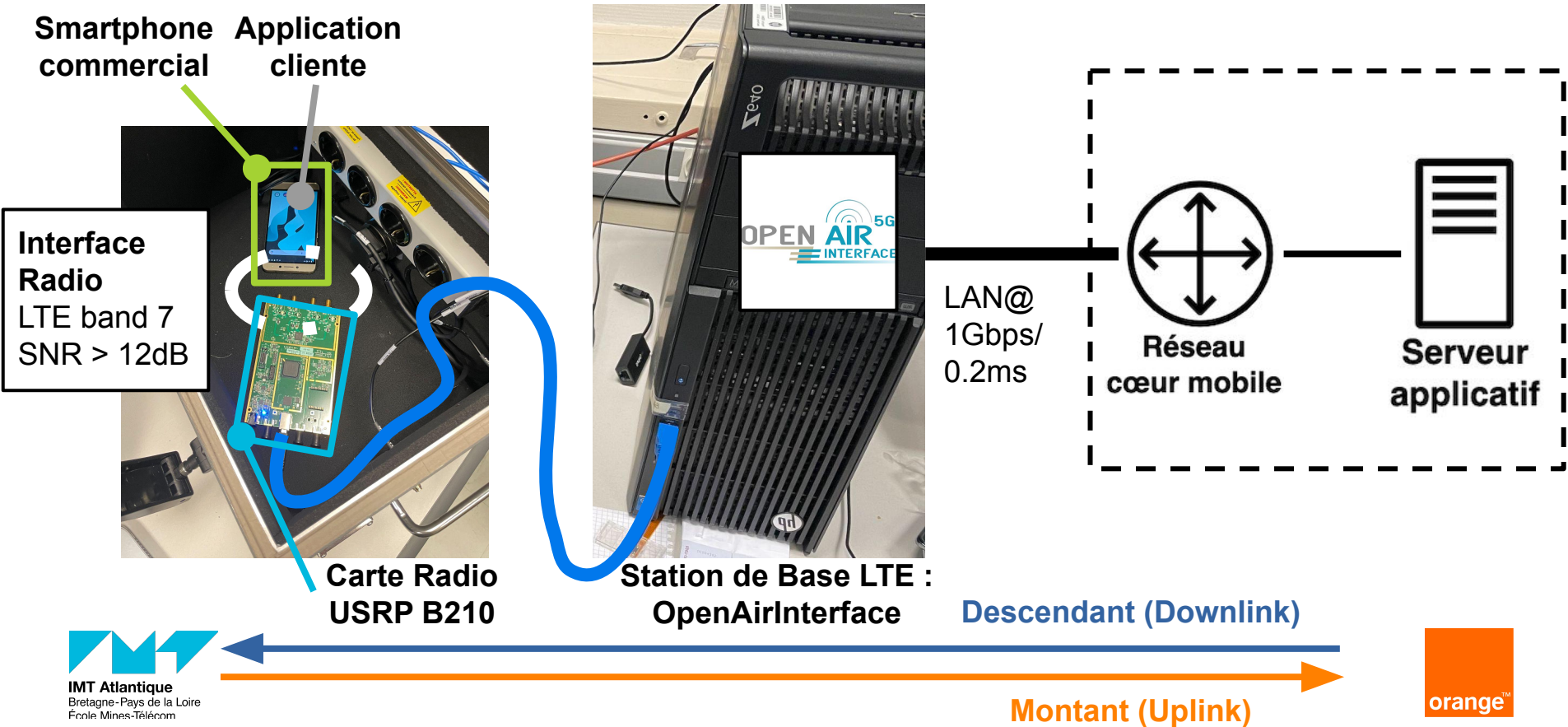
Reproductibilité avec un environnement radio contrôlé

Réalisme avec des smartphones du commerce

Développement de solutions dans la station de base



Plateforme expérimentale : Maquette

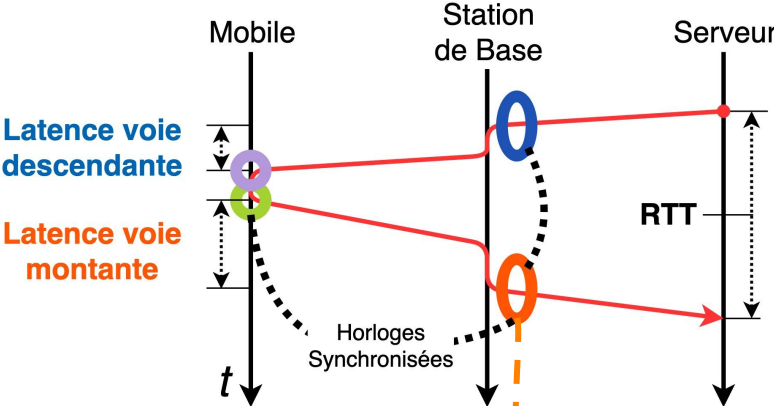




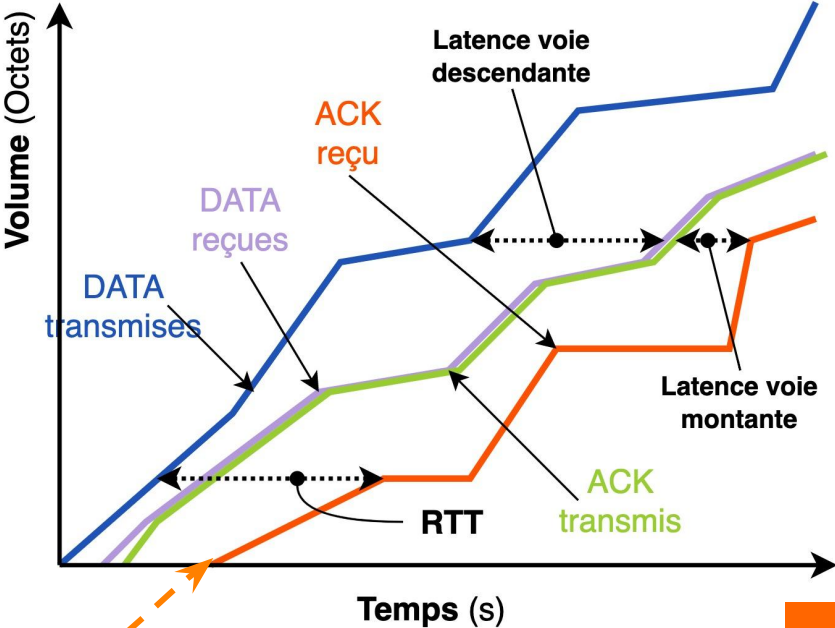
Tous les flux sauf Voix
sur IP (VoLTE)

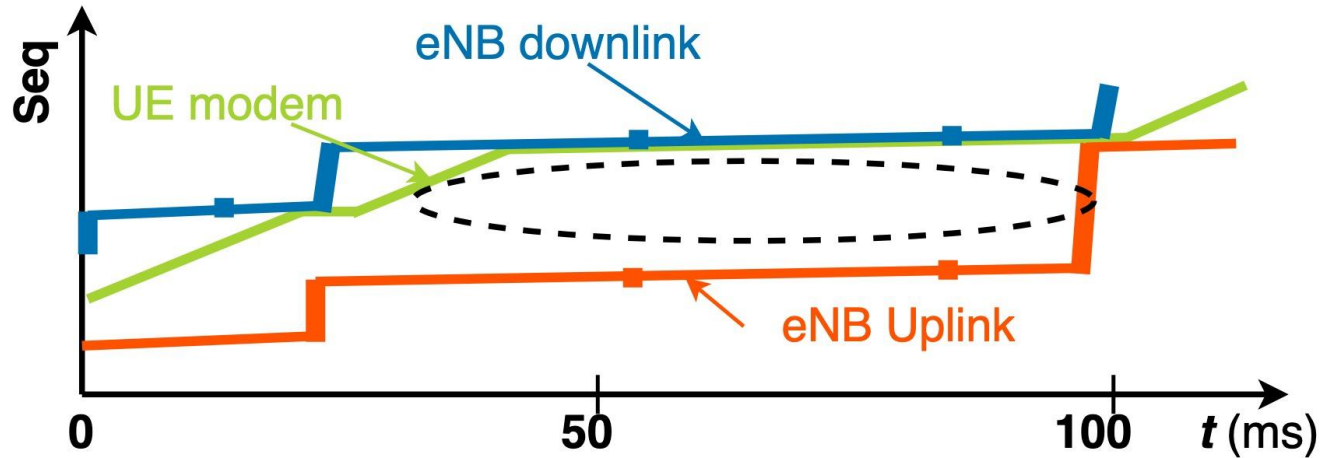
Parameter	Value
Base Station	OAI eNodeB (lte-softmodem)
#UE	2
Antenna format	SISO
Air Interface quality	SNR > 12 dB
E-UTRA Band	7
Frequency	2.56 GHz (UL) / 2.68 GHz (DL)
Radio frame structure	FDD
Bandwidth	10 MHz
#PRB	50
Max. modulation	16-QAM (UL) / 64-QAM (DL)
Max. achievable datarate	17 Mbps (UL) / 37.5 Mbps (DL)
Radio slot duration	0.5 ms
Radio subframe duration	1 ms
HARQ max retx	4
HARQ retx delay	8 ms
Radio Bearer QoS	Best-Effort
RLC mode	Acknowledged Mode
RLC τ -Reordering	32 ms
DRX	Not configured
Scheduling algorithm	Round-Robin / Proportional-Fair
SR periodicity	10 ms
BSR periodicity	64 ms

Mesure "Endpoint"



Mesure "Midpoint"





Captures eNB/UE d'un flux TCP

LatSeq¹

(Latency Sequence analysis)

1. Ronteix--Jacquet et al., “**LatSeq: A Low-Impact Internal Latency Measurement Tool for OpenAirInterface**”, WCNC’21 (2021)

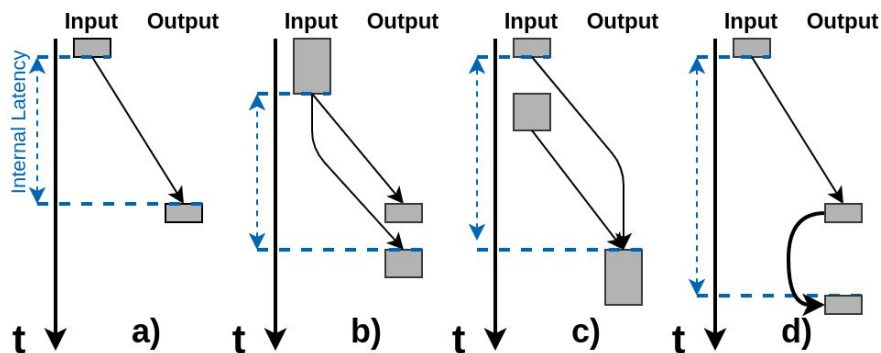
Branche git LatSeq sur le dépôt du projet OAI:
gitlab.eurecom.fr/oai/openairinterface5g/-/tree/latseq

Dépôt de l’outil sur **Github**:

<https://github.com/Orange-OpenSource/LatSeq>



IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom



a) transmission directe

b) Segmentation de paquet

c) Concaténation

d) Retransmissions

Les latences internes du RAN

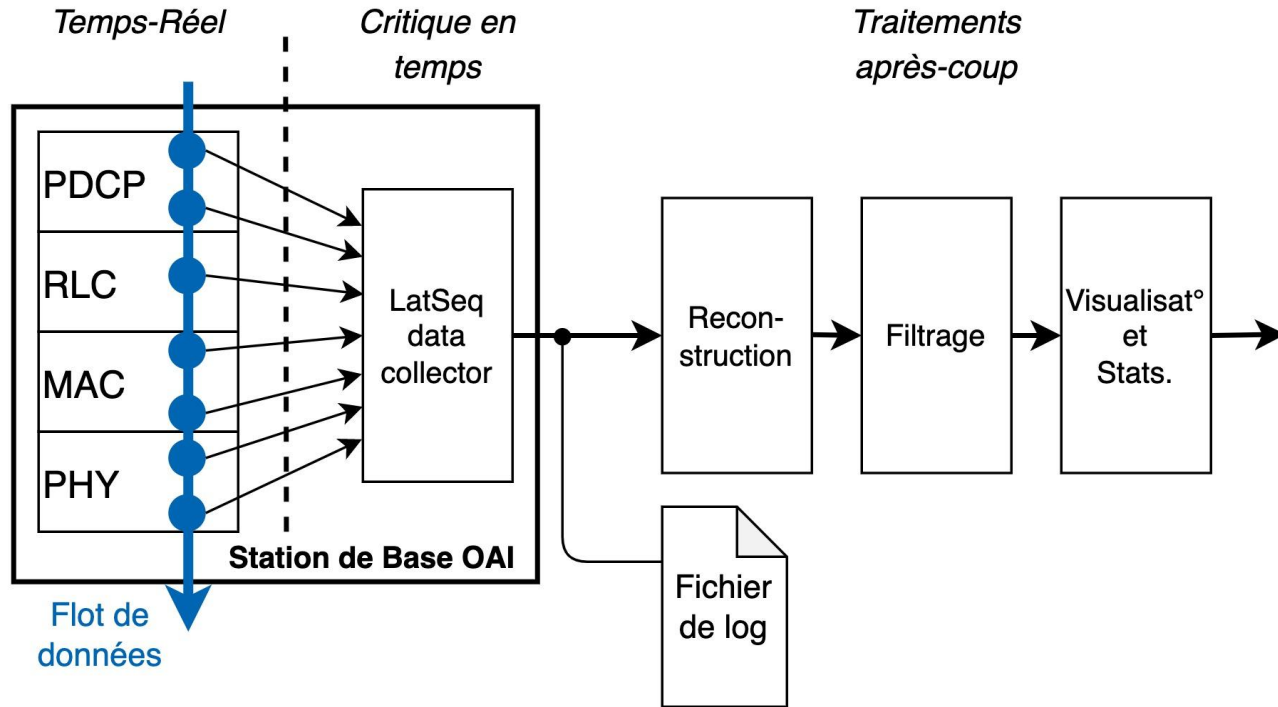
- Retransmissions radios
- Ordonnancement entre terminaux
- Acquisition du canal
- Sérialisation des données
- Mobilité de cellule

Besoins sur la mesure

- Niveau paquet
- Précision à une microseconde
- Décomposition fine des latences internes

Contraintes

- La mesure ne doit pas ajouter de latence aux paquets
- Impact limité de l'outil sur les performances de la station de base



```
1 #ifdef LATSEQ
2     LATSEQ_P("D rlc.tx.am--rlc.seg.am",
3             "len%d:rnti%d:drb%d.sdu%d.rsn%d.rso%d",
4             sdu->size, entity->ue_rnti, entity->channel_id, sdu->sdu_num, pdu->sn, pdu->so
5             );
6 #endif
```

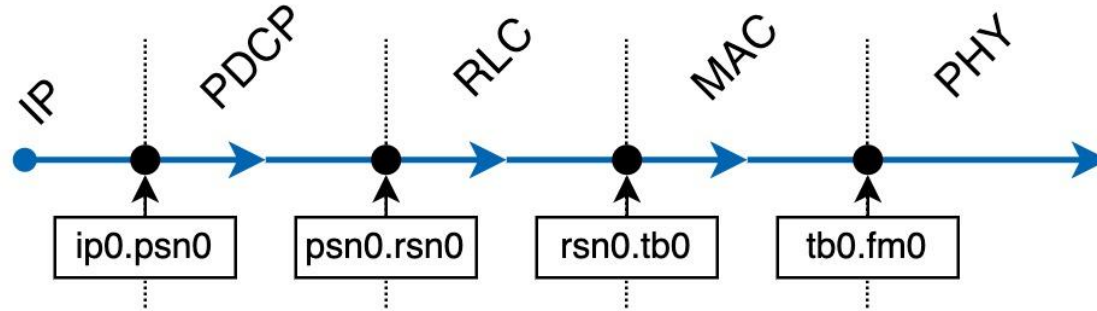
```
1 20201030_203524.504785 D pdcp.tx--rlc.tx.am len62:rnti53421:drb1.psn87.sdu88
2 20201030_203524.506512 D rlc.tx.am--rlc.seg.am len62:rnti53421:drb1.sdu88.rsn72.rso0
3 20201030_203524.506513 D rlc.seg.am--mac.mux len64:rnti53421:drb1.lcid3.rsn72.rso0.reqfm686
```

↑
Temps

↑
Position

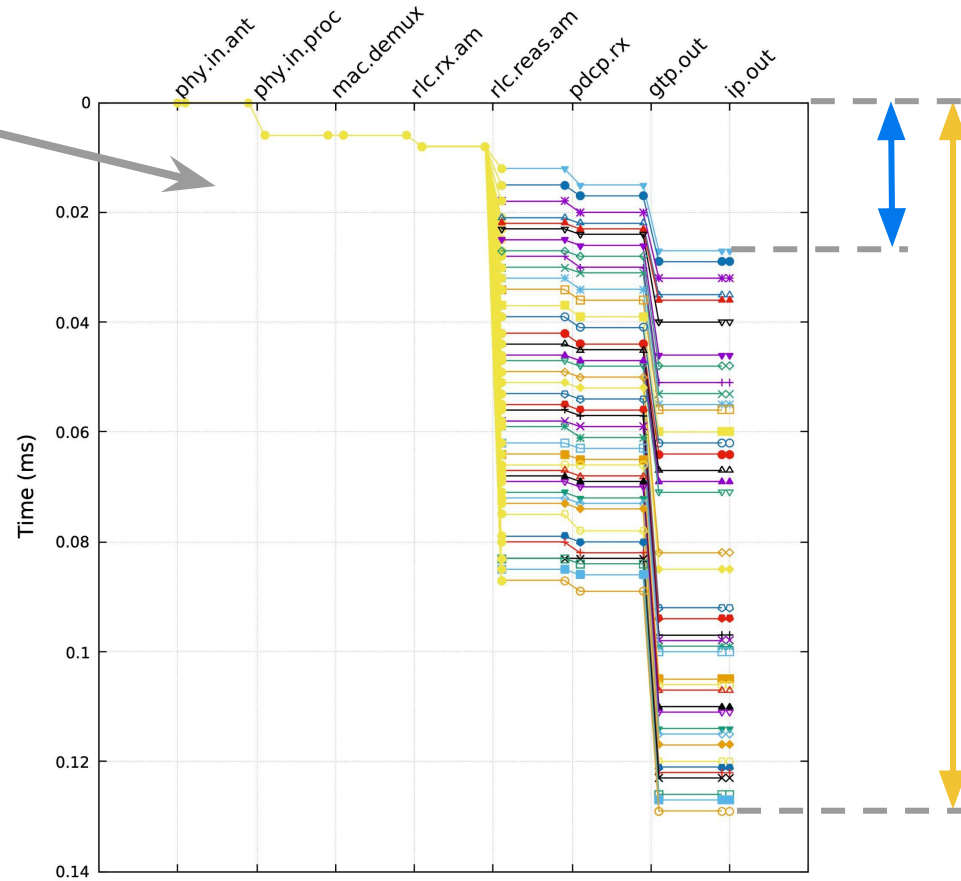
↑
Propriétés

↑
Identificateurs



LatSeq : Visualisation “cascade”

Transmission montante dans la station de base



Experiment in low-load conditions	Unit	Baseline		LatSeq	
		μ	σ	μ	σ
Fingerprint generation time with 1 argument	ns	0		10.98	0.2
Data collector memory usage	kB	0		150	
Linux load average	%	0.70	0.03	0.81	0.03
Linux load average in loaded condition	%	1.18	0.065	1.25	0.075

Contribution au projet OpenAirInterface

Branche git LatSeq sur le dépôt du projet OAI:

gitlab.eurecom.fr/oai/openairinterface5g/-/tree/latseq

Mis en open-source de l'outil pour d'autres usages

Dépôt de l'outil sur Github:

<https://github.com/Orange-OpenSource/LatSeq>

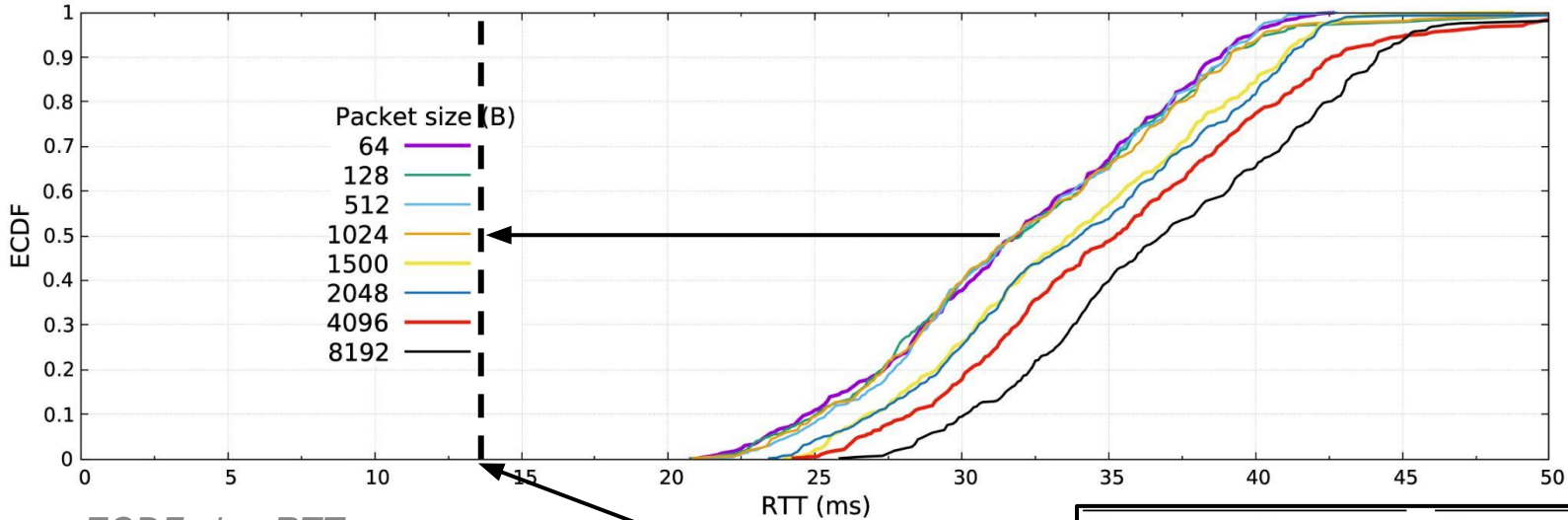


La latence de la voie montante²



IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

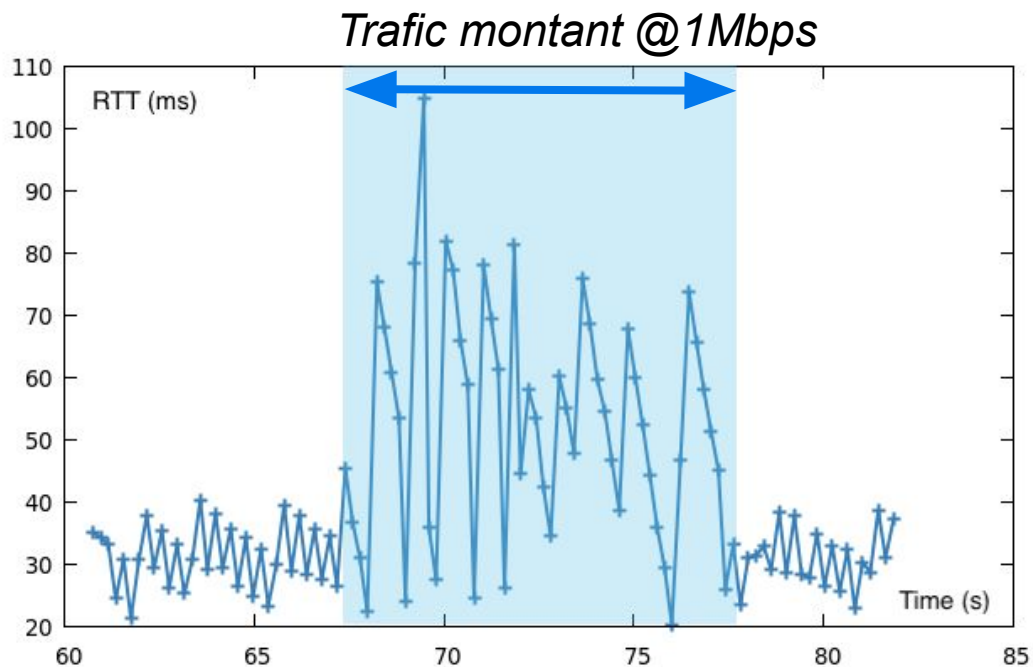
2. Ronteix--Jacquet, “On Radio Access Network Uplink Latency and Jitter: Measurements and Analysis”, ITC-33 (2021)



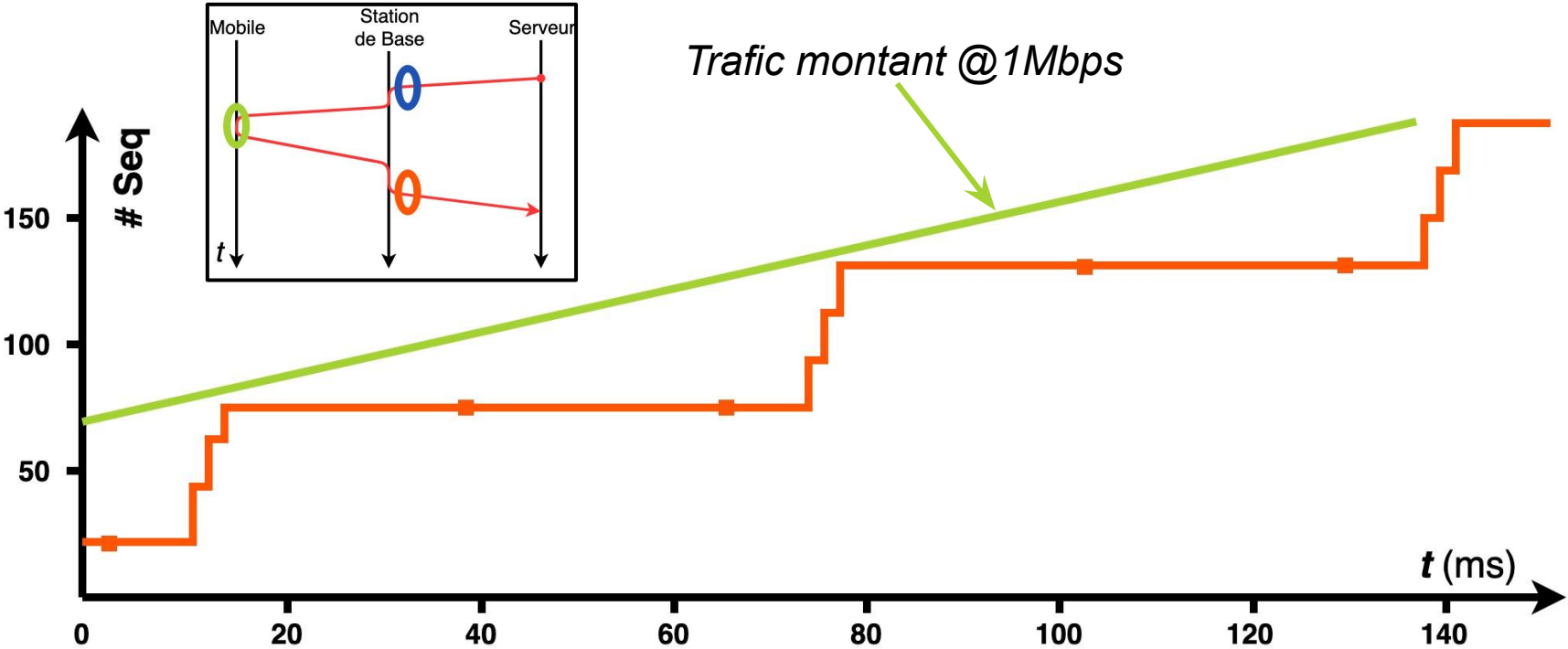
ECDF ping RTT pour différentes taille de paquet pour un RAN non chargé dans des bonnes conditions radio

4G = 13.5 ms
 5G NSA = 11.5 ms
 5G SA = 10 ms
 5G URLLC = 1~5 ms

Step	Value	Step	Value
BS proc.	1 ms	SR align.	t_{SR} (≈ 10 ms)
TTI align.	t_{FA} (< 1 ms)	SR tx	1 ms
Data TTI	1 ms	BS sched.	3 ms
UE proc.	1.5 ms	UG tx	1 ms
HARQ retx	$t_{HARQ} \times P_{BLER}$	UE proc.	3 ms
Total downlink (ms)	$3.5 + t_{FA} + t_{HARQ} \times P_{BLER}$	Data TTI	1 ms
		BS proc.	1 ms
		HARQ retx	$t_{HARQ} \times P_{BLER}$
(a) In the Downlink		Total uplink (ms)	$10 + t_{SR} + t_{HARQ} \times P_{BLER}$
		(b) In the Uplink	



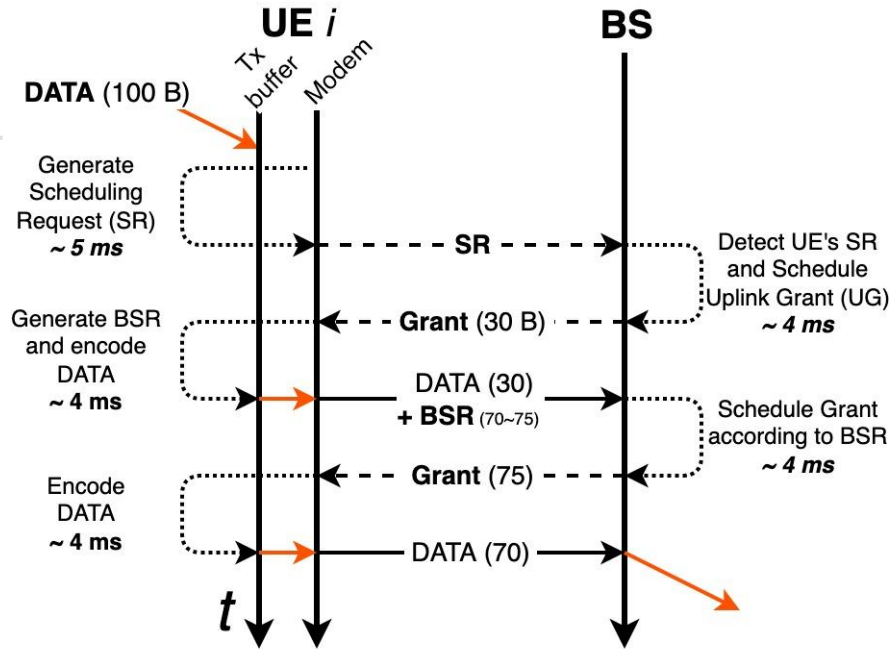
Evolution du RTT du RAN au cours du temps sans et avec un trafic concurrent, dans un environnement radio stable et sans concurrence d'accès



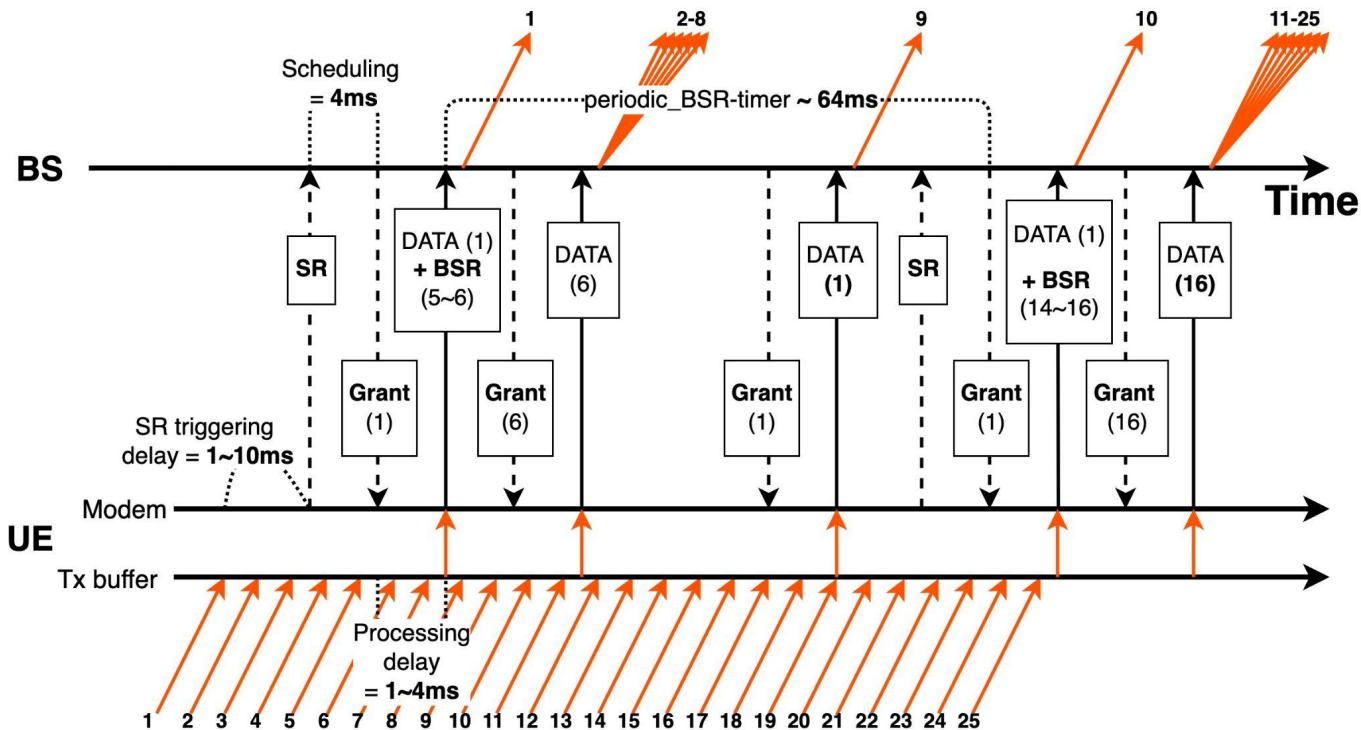
Profil de transmission du trafic montant

	Scheduling Request	Buffer Status Report
Couche	PHY	MAC
Information transmise	Demande d'accès	Taille du buffer de tx RLC
Taille	1 symbole	1~4 octets
Intervalle de tx	~ 10 ms	~ 40-70 ms

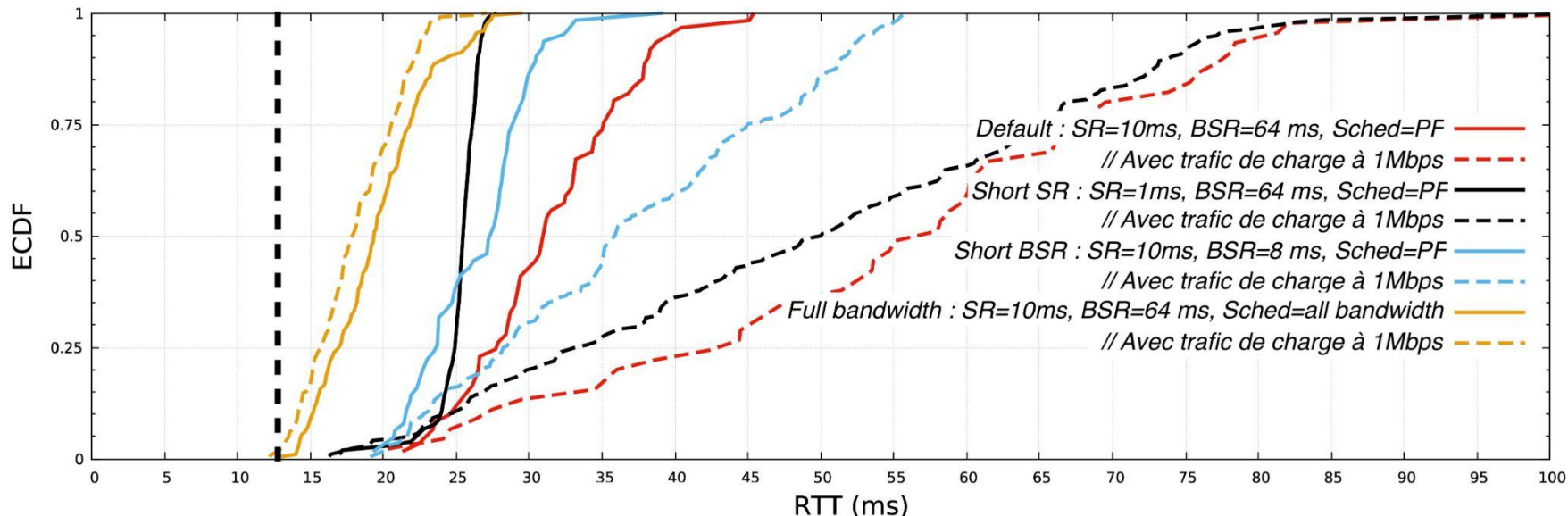
	Scheduling Request	Buffer Status Report
Couche	PHY	MAC
Information transmise	Demande d'accès	Taille du buffer de tx RLC
Taille	1 symbole	1~4 octets
Intervalle de tx	~ 10 ms	~ 40-70 ms



Allocation des ressources radio de la voie montante basée sur les "Grants" tel que présenté dans la littérature



Dynamique de transmission des paquets d'un trafic régulier avec la méthode d'allocation des ressources radio basé sur les "Grant", SR et BSR



ECDF du RTT en fonction des configurations SR/BSR/UG de la voie montante

Enhanced-BSR³

un travail sur le problème d'estimation basée sur le BSR

3. Ronteix--Jacquet et al., “Rethinking Buffer Status Estimation to Improve Radio Resource Utilization in Cellular Networks”, VTC'22 Spring (2022)



Ronteix--Jacquet, Ferrieux, Hamchaoui
“Optimisation de la gestion d'allocation
ressources radio à travers un réseau d'accès
cellulaire”

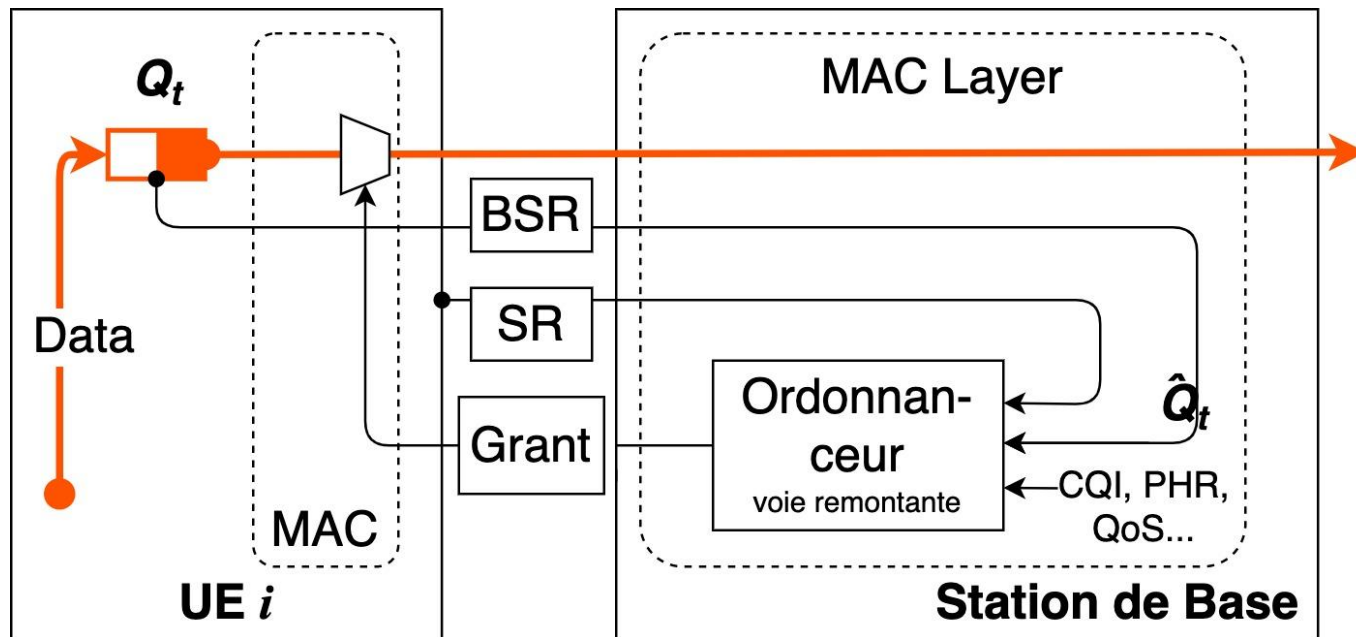
Brevet FR 2111020 (2021)

Réaliser une **estimation continue des besoins en transmission** des terminaux

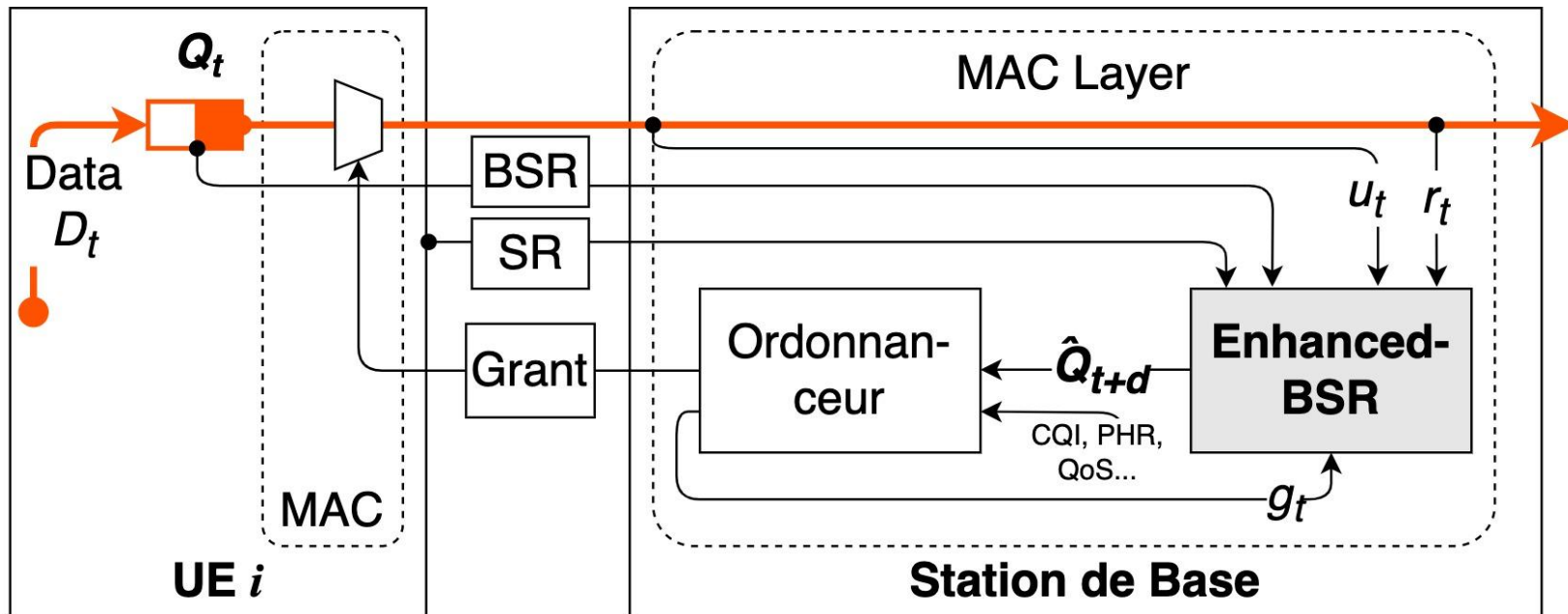
Faire une **prédiction de la taille du buffer de transmission** du terminal utilisée par l'algorithme d'ordonnancement

Prendre en compte la **déployabilité** : Pas de **modifications des terminaux**, de l'**algorithme d'ordonnancement** ou de la **configurations**, compatibilité avec le **standard 3GPP**

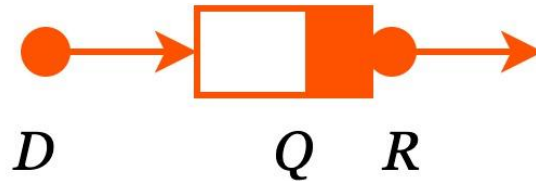




Modèle simplifié d'allocation des ressources radio basé sur les grants



Modèle simplifié d'allocation des ressources radio avec la proposition de modèle d'estimation

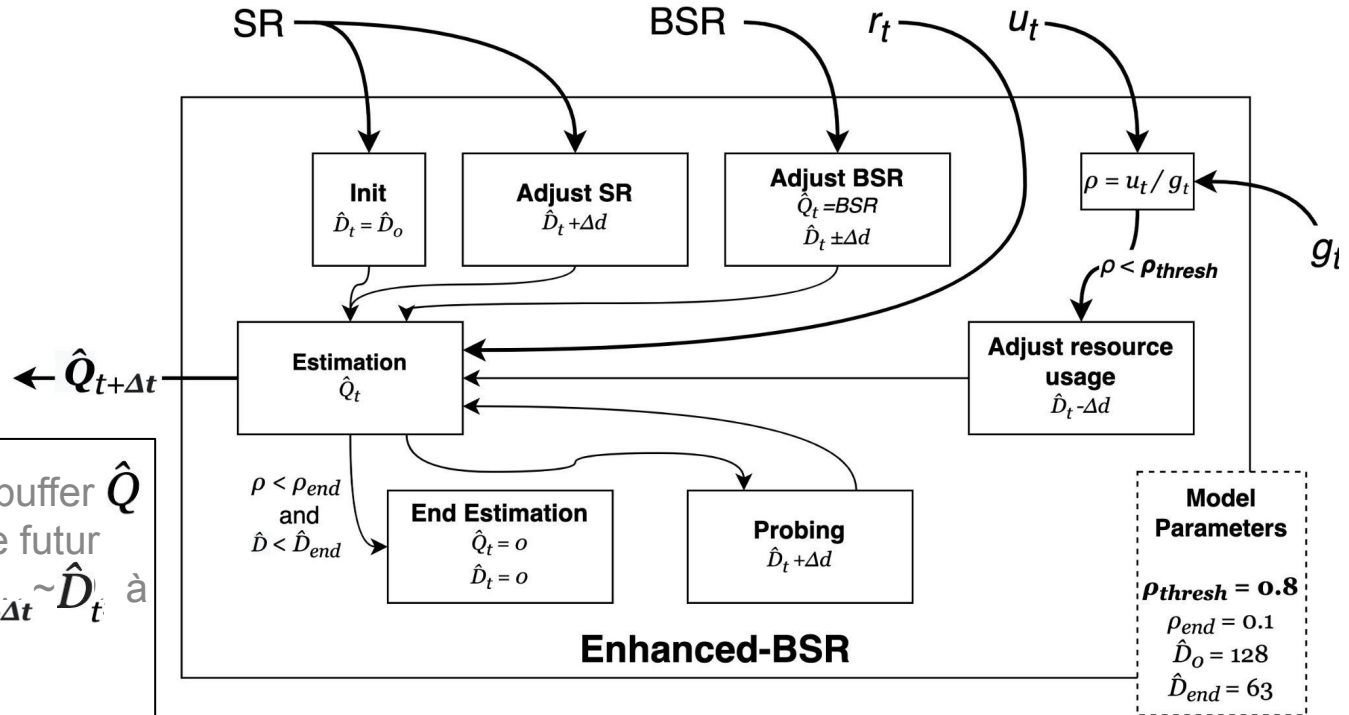


Modélisation du terminal comme une file d'attente FIFO \hat{Q} unique

Se remplit à un débit constant \hat{D} généré par une source hypothétique

Se vide à la transmission d'un bloc de données de taille r suivant un Grant

→ **Objectif** : estimer le débit source \hat{D} , maintenir une estimation de \hat{Q}



Prédiction de la taille du buffer \hat{Q} dans un temps Δt dans le futur sous l'hypothèse que $\hat{D}_{t+\Delta t} \sim \hat{D}_t$ à partir de l'état courant

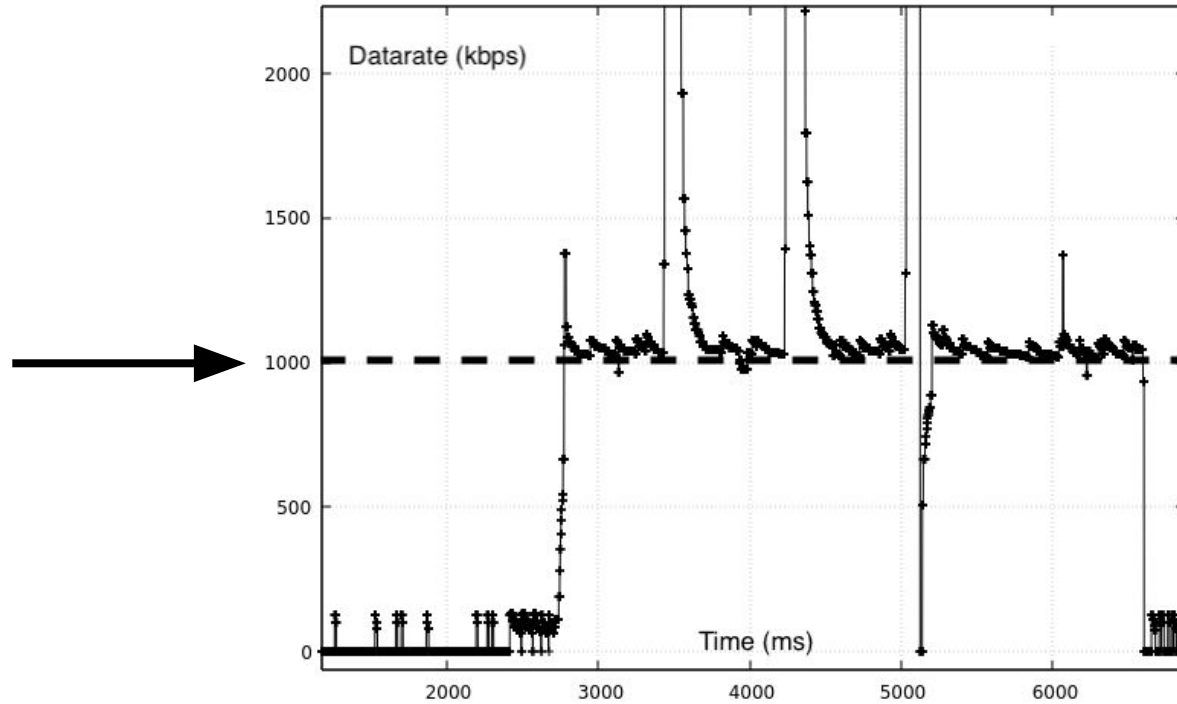
La valeur est utilisée par l'ordonnanceur dynamique MAC pour calculer la taille du grant

Valider le modèle d'estimation sans modifications de l'algorithme d'ordonnancement, des configurations ou la norme 3GPP

Analyser l'**impact sur la latence et le taux d'utilisation** des ressources radio

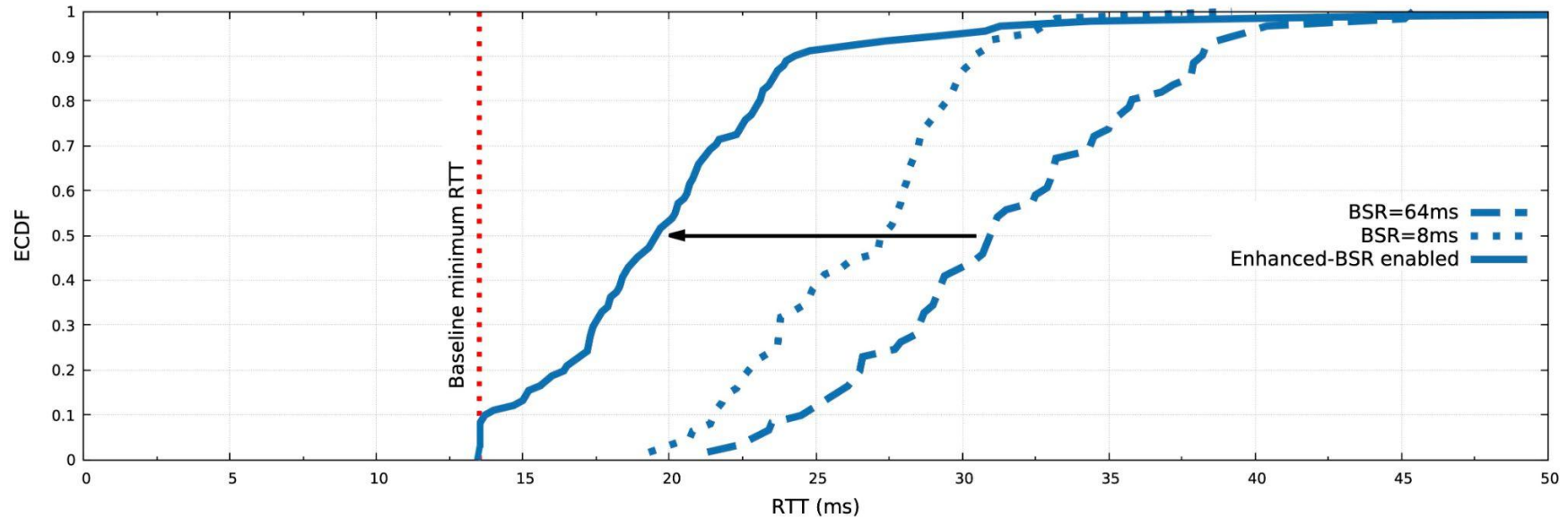
Observer l'**impact sur les trafics TCP**



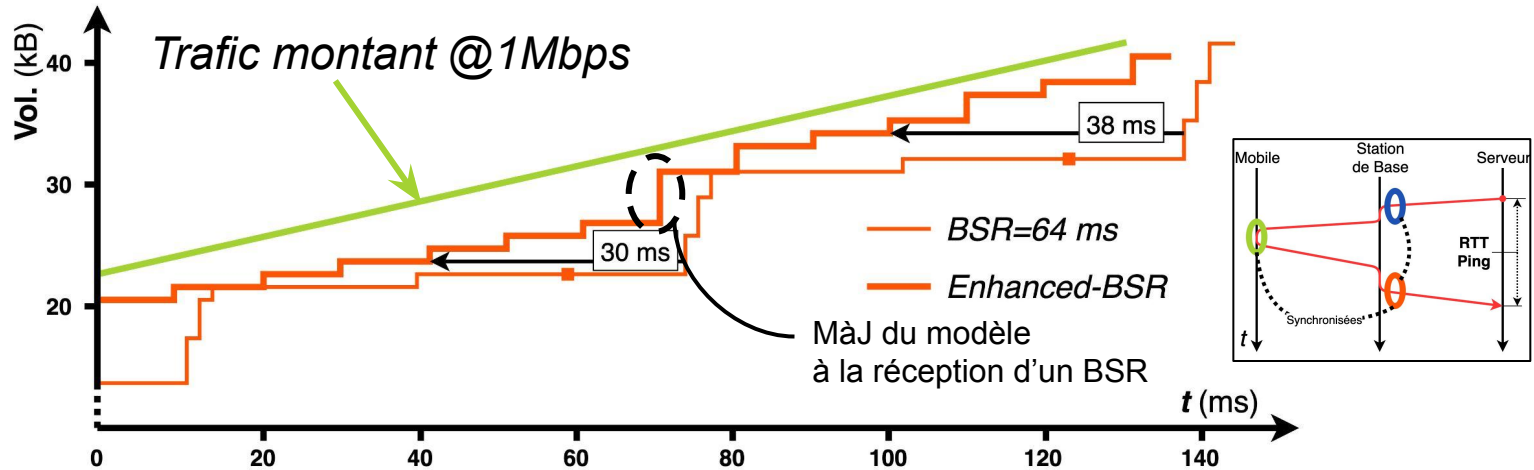


Débit source estimé





ECDF Ping RTT

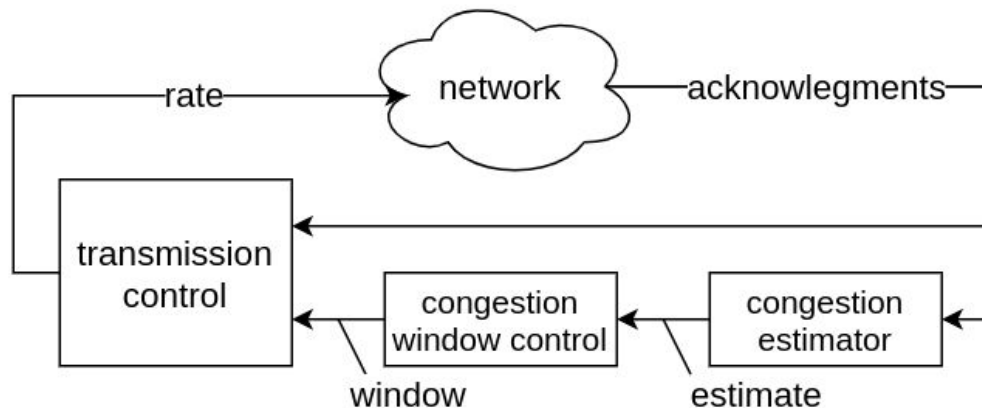


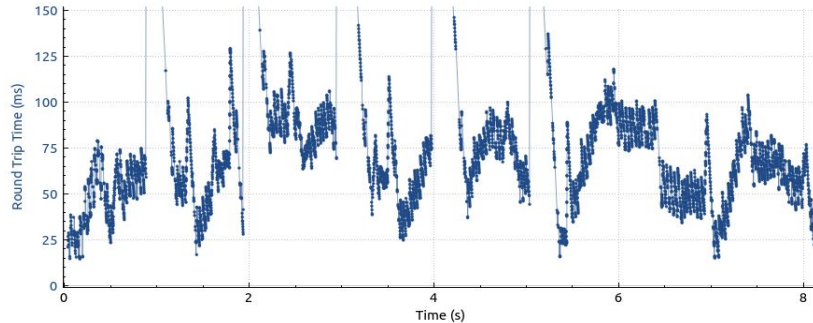
	BSR=64 ms	eBSR
RTT median	52 ms	19 ms
Jitter	47 ms	10 ms
Taux d'utilisation	82.5 %	72.0 %

Protocole de transmission des données majoritaire sur Internet

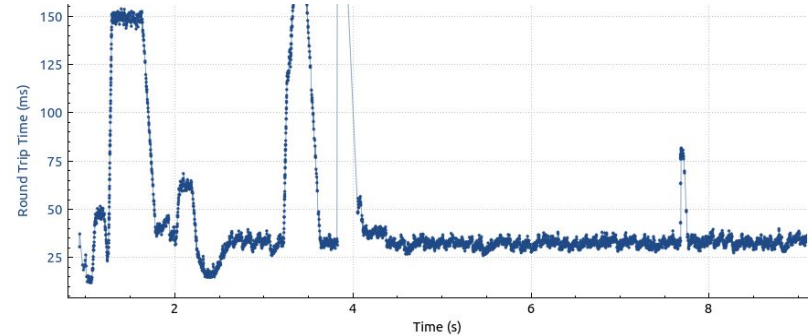
Flux contrôlé (comme Quic)

→ **Boucle de rétroaction** et **algorithme de contrôle de congestion** sensibles aux pertes, à la latence et la gigue





RTT TCP BSR=64 ms



RTT TCP enhanced-BSR

	BSR=64 ms	eBSR
Débit	28.0 Mbps	32.0 Mbps
RTT		
Médian	55 ms	32 ms
Max	125 ms	60 ms

Conclusion



IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

- 1) Le mécanisme d'allocation des ressources radios de la **voie montante** introduit des **latences et de la gigue**
- 2) Une **méthode de mesure des latences internes** du RAN a été proposée et évaluée : **LatSeq**
- 3) Une **proposition au problème de l'estimation des besoins en transmission** des terminaux : **Enhanced-BSR**
→ Réduction de la latence et de la gigue

Implémentation de LatSeq pour une **station de base 5G OAI**

Intégration de LatSeq au **projet officiel OpenAirInterface**

Développement d'**outils d'analyse** basés sur LatSeq pour le troubleshooting des RANs logiciel (SD-RAN)



Validation sur un plus grand nombre d'**autres trafics** (ex. Gaming)

Validation avec **plusieurs terminaux** (ordonnancement)

Évaluer d'**autres modèles d'estimation** (Online learning,...) pour les trafics mal estimés par un modèle linéaire

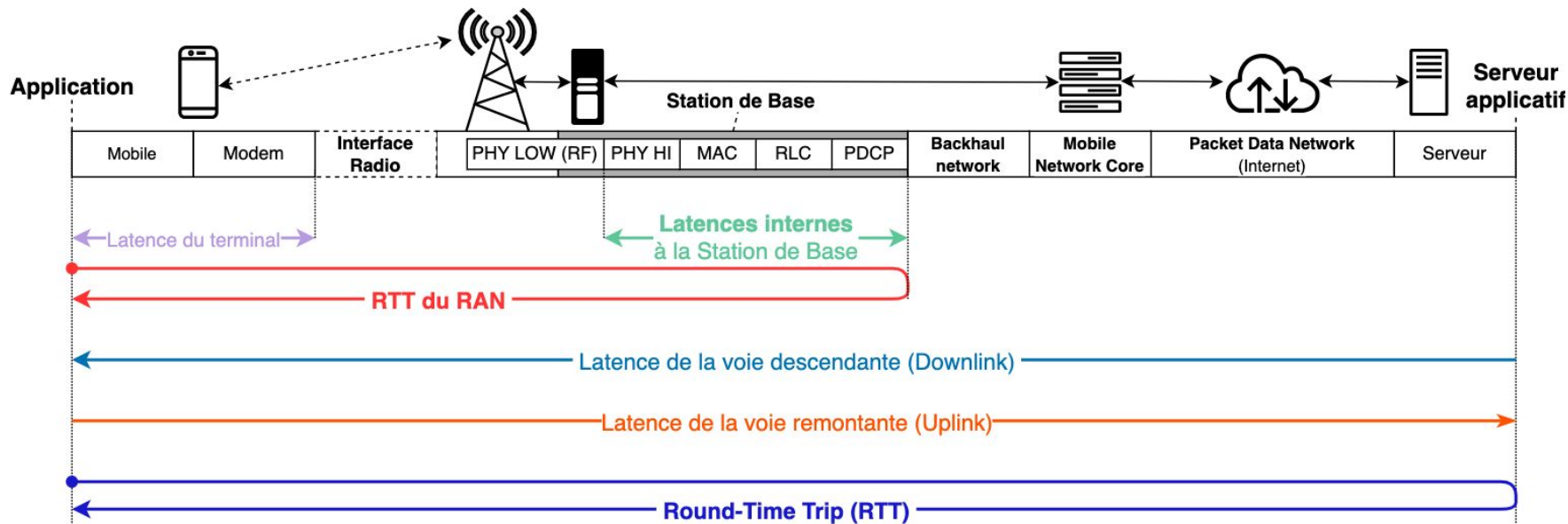


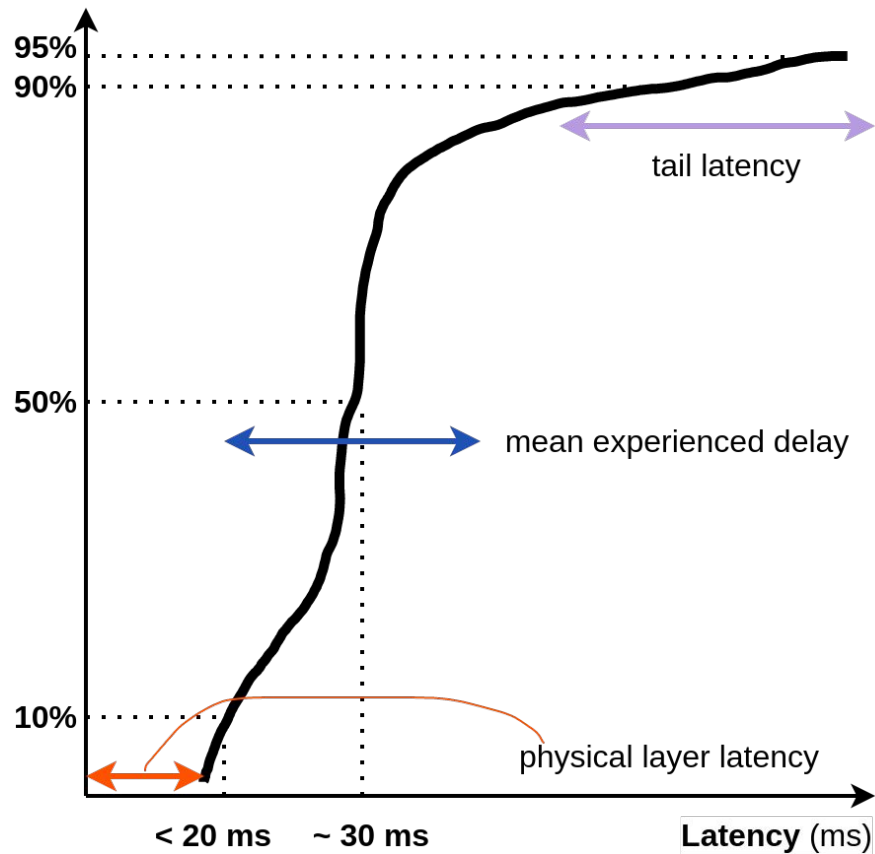
- Ronteix--Jacquet et al., “**LatSeq: A Low-Impact Internal Latency Measurement Tool for OpenAirInterface**”, WCNC’21 (2021), Nanjing, Chine.
- “**A Low-Impact Internal Latency Measurement Tool**”, <https://github.com/Orange-OpenSource/LatSeq>
- Ronteix--Jacquet, “**LatSeq for OpenAirInterface**”, OAI summer workshop, 2021.
- Ronteix--Jacquet, “**On Radio Access Network Uplink Latency and Jitter: Measurements and Analysis**”, ITC-33 (2021), Avignon, France.
- Ronteix--Jacquet, “**Considering return path latency in access networks**”, NetSatDay meets NoF (2021), Toulouse, France.
- Ronteix--Jacquet et al., “**Rethinking Buffer Status Estimation to Improve Radio Resource Utilization in Cellular Networks**”, VTC’22 Spring (2022), Helsinki, Finlande.
- Ronteix--Jacquet, Ferrieux, Hamchaoui “**Optimisation de la gestion d’allocation ressources radio à travers un réseau d’accès cellulaire**”, Brevet FR 2111020 (2021)

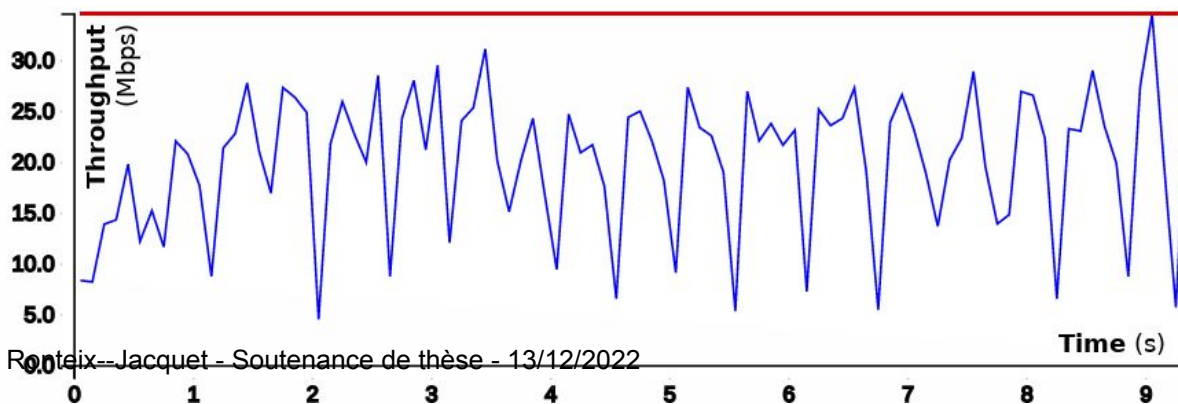
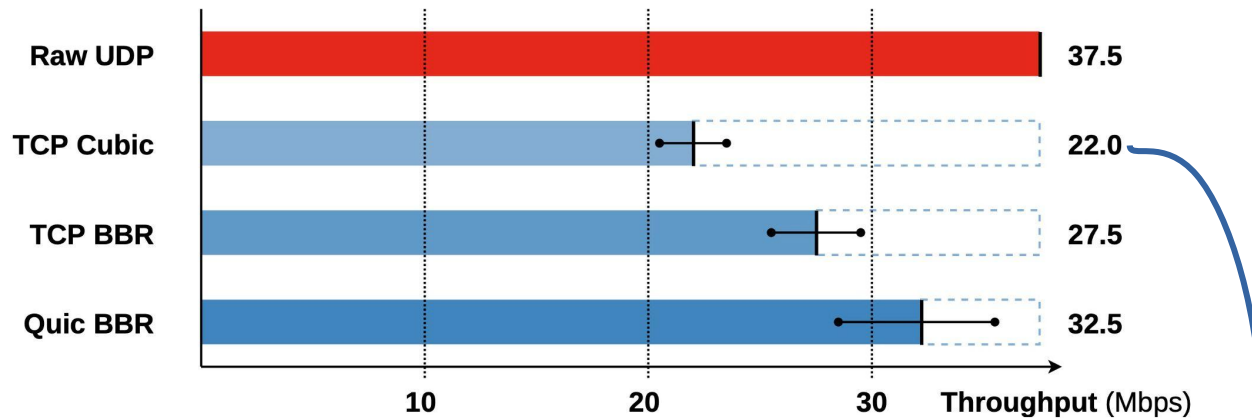
Annexes



IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

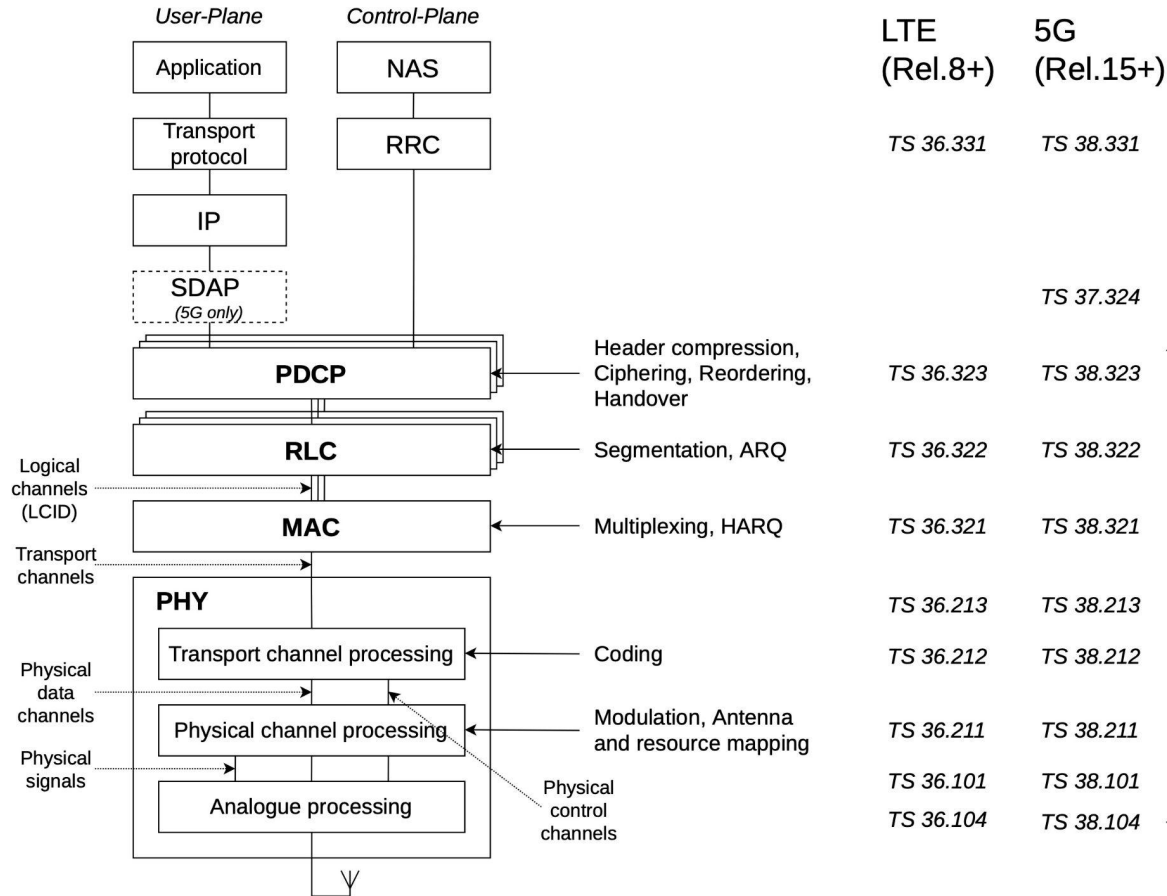


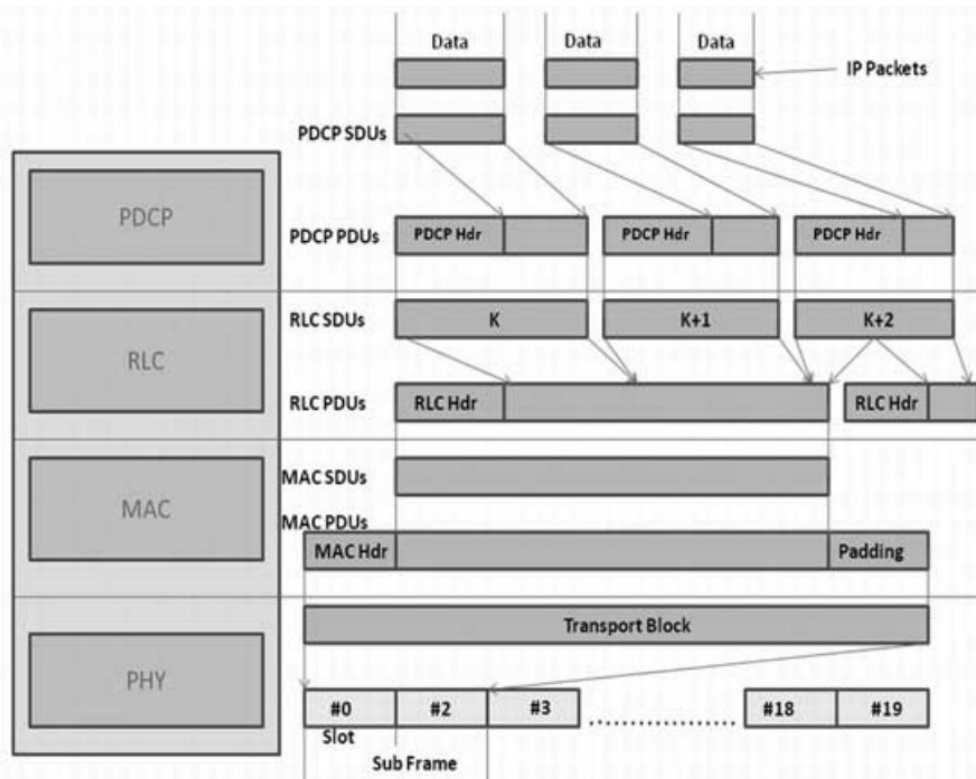




Delays (from [105] chapters)	Delay type							Techniques	5G mechanisms and related research	Related studies for instance
	P	V	Q	S	E	I	H			
Structural (§II)		V						Content placement	Mobile Edge Computing	[106–109]
								Virtualization	Cloud-RAN	[27, 110–112], [28]-13.7,[113]-VI
Signal propagation (§IV-A)		V						Optimized propagation line	AAS, CoMP	[114, 115]
		P	V					Short transmission time	Frame structure	[116–120],[121]-III.A, [122]-IV.A,[24]-IV.A
Medium acquisition (§IV-B)						I		Connection establishment	Optimized Random Access procedure	[123, 124],[125]-2,[126]-IV.A
						I		Session re-establishment	RRC IDLE mode	[127]
					S			Air interface access	Scheduling timing	[128]
Serialization (§IV-C)		P						Concatenation and Segmentation	Refactoring of in-sequence delivery and PDU segmentation	[129]-7.1.2,[130]
Link error recovery (§IV-D)					E			Error detection and Recovery	Optimized IR-HARQ and shorter HARQ ACK feedback	[131–133],[134]-VIII, [129]-7.1.1
Switching and Forwarding (§IV-E)							H	Inter-cell communication	Handover procedure	[135],[129]-7.2.2, [126]-IV.C
Queuing (§IV-F)				S				Flow and circuit scheduling	Slicing and QoS flow	[27]
				Q				Smaller network buffer	RLC buffer sizing	[136]
				S	E			Packet Scheduler	Agile scheduler and flexibilities	[50],[24]-V.A, [122]-IV.B,[126]-V.B
				S				Traffic shaping and policing	Grant-free access	[137]
				Q				Queue Management	Policy Control Function (PCF)	[138]
				Q				Queue Management	L4S for 5G	[139–141]
Insufficient capacity (§V-A)		P						Leveraging interfaces	LDPC coding, higher MCS, higher frequency, wider bandwidth, Carrier-Aggregation	[153–155]
					S	E		Multiple links	Massive-MIMO, multi-connectivity	[114, 156–158]
Under-utilized capacity (§V-C)								Congestion control sensing	ACK feedback loop	[76, 85, 159–161]
								More aggressive congestion control	Assisted capacity sensing, ECN	[162–164], [161, 165]
								More aggressive congestion control	Slow-start, CCA	[81, 82, 166–168]

Table 1.2 – Types of delays and techniques for reducing latency in 5G (*adapted from [105] for mobile network case*). *P*: processing, *V*: propagation, *Q*: queuing, *S*: scheduling, *E*: link error, *I*: medium acquisition, *H*: handover.





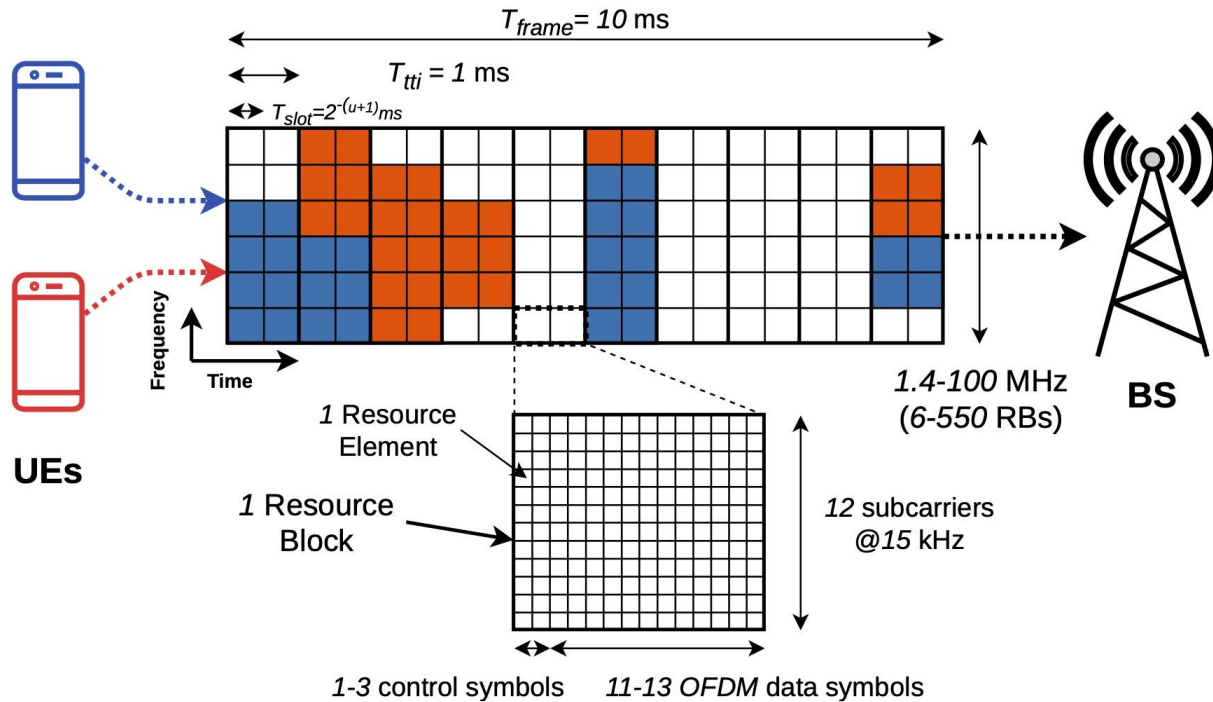
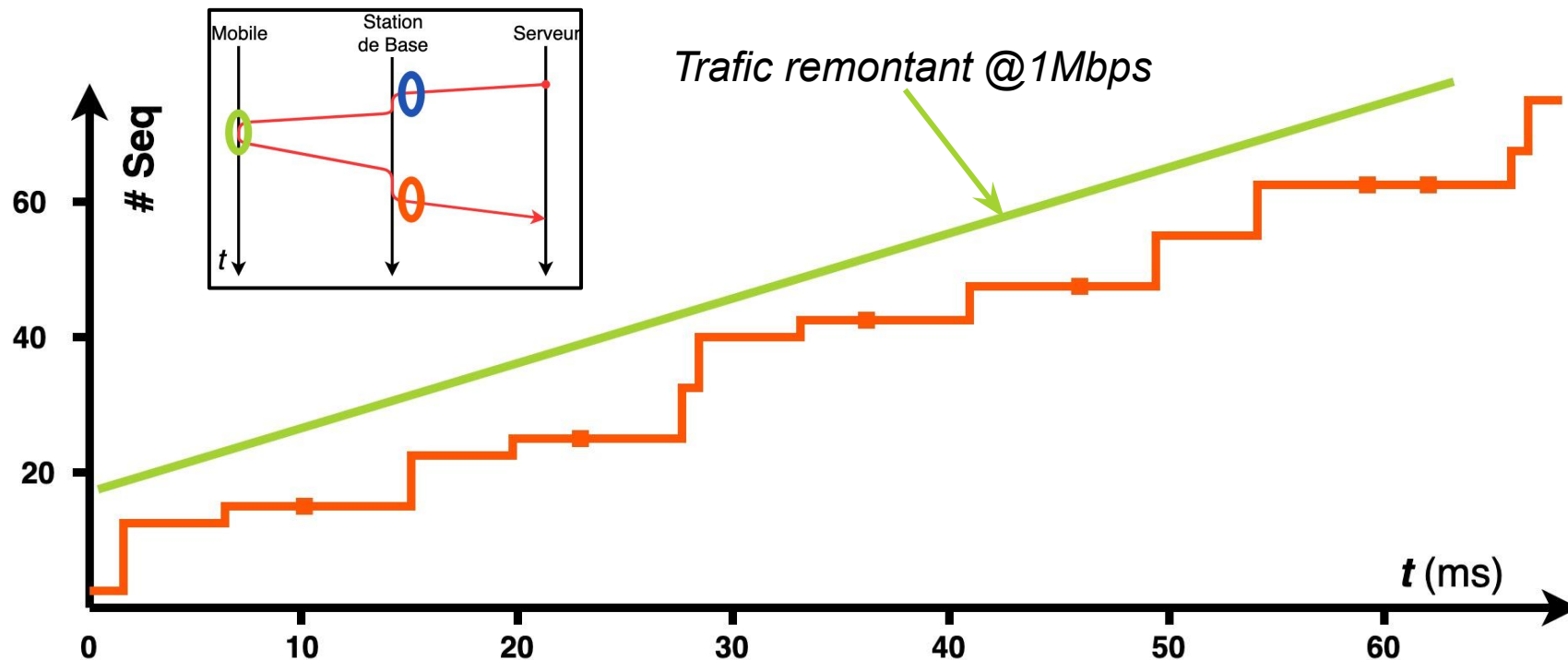


fig : Grille de ressources radio

Latence de la voie remontante

fig : Profil de transmission du trafic remontant dans le réseau de production



Latence de la voie remontante

Observations dans la littérature

60

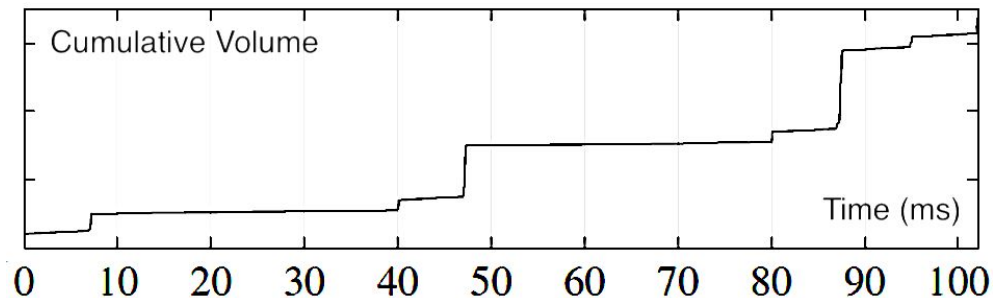


fig : Profil de transmission du trafic dans “Exll: an extremely low-latency congestion control for mobile cellular networks”, Park et al. (2018)

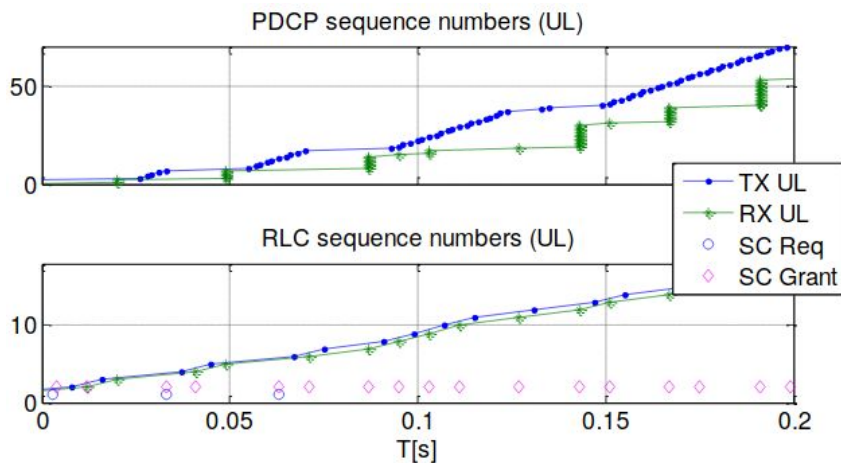
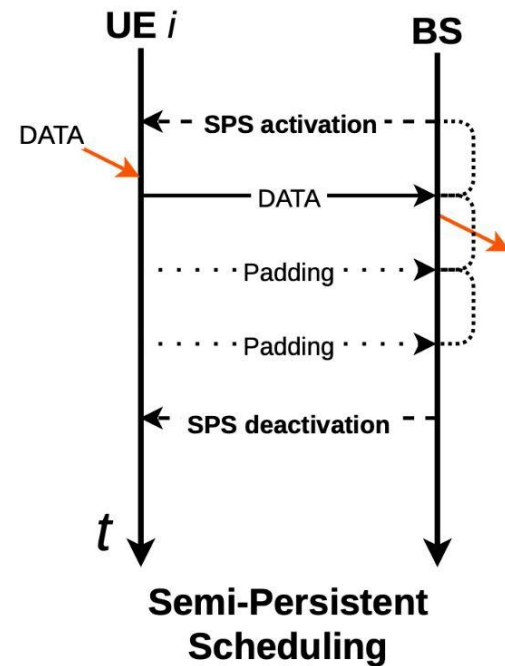
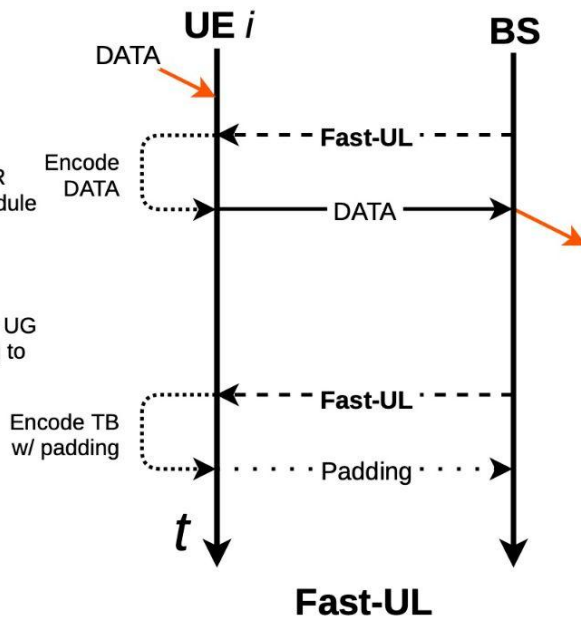
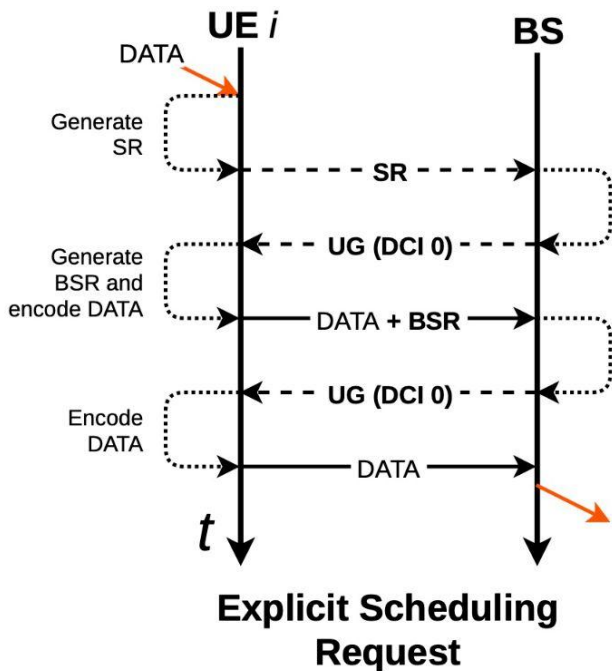


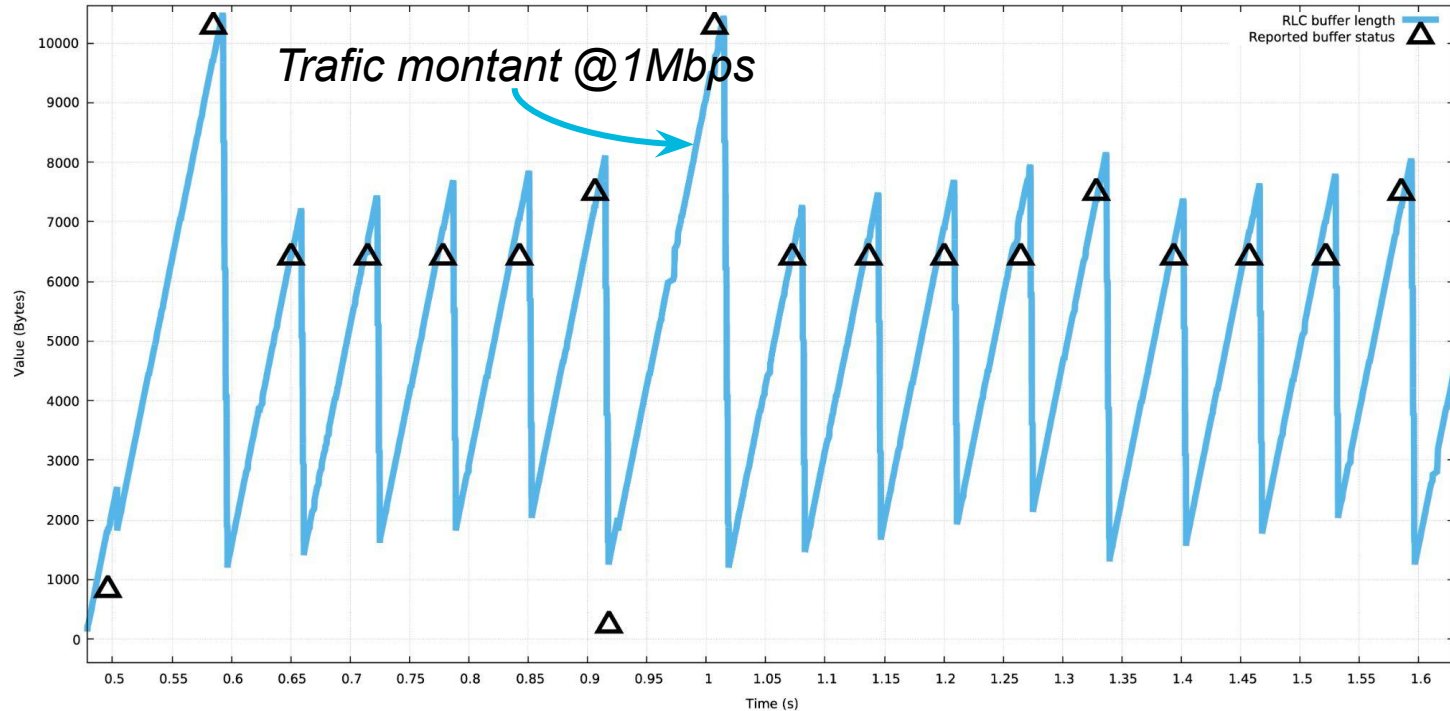
fig : Profil de transmission du trafic dans “Congestion Control for 4G/5G Networks IETF 96”, Johansson (2016)



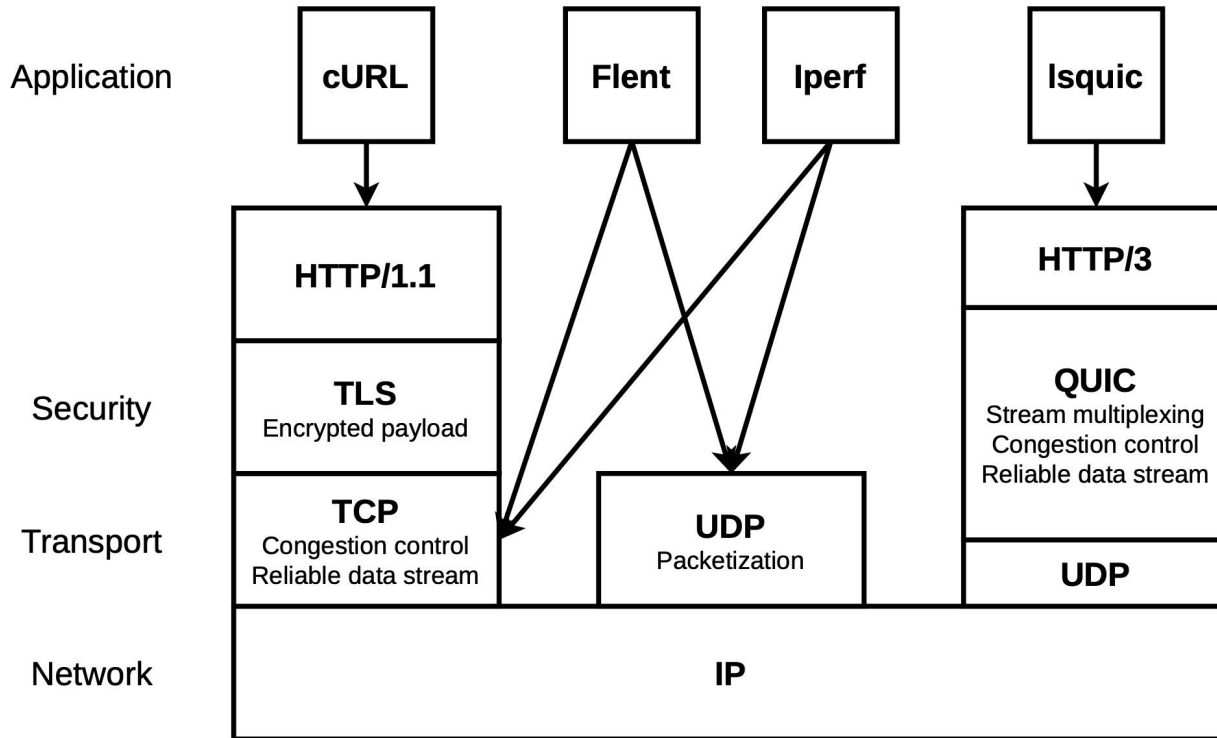
	Scheduling Request	Buffer Status Report
Layer	PHY	MAC
Channel	PUCCH	Uplink MAC CE
Size	A part of an OFDM symbol	1 to 4 TB bytes
Information carried	Request access	RLC tx buffer size
Granularity	1 bit	6 bits (LTE)
Tx opportunity	every 1-80 subframes (typically 10)	at least every 1-2560 ms (typically 32)

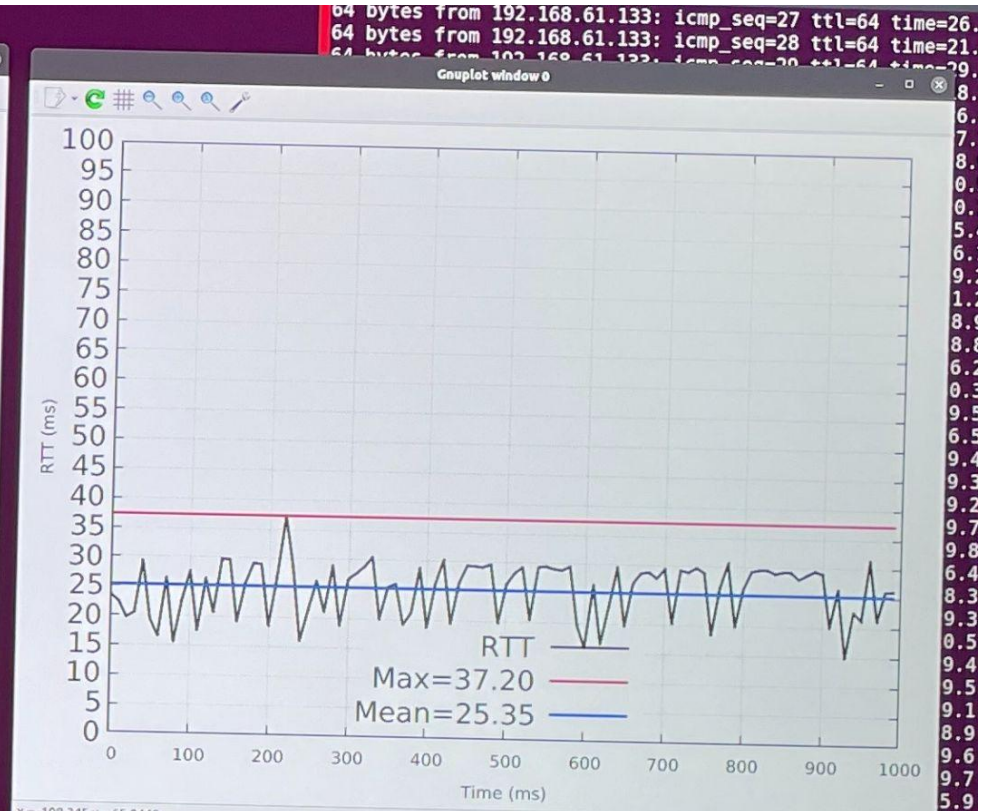
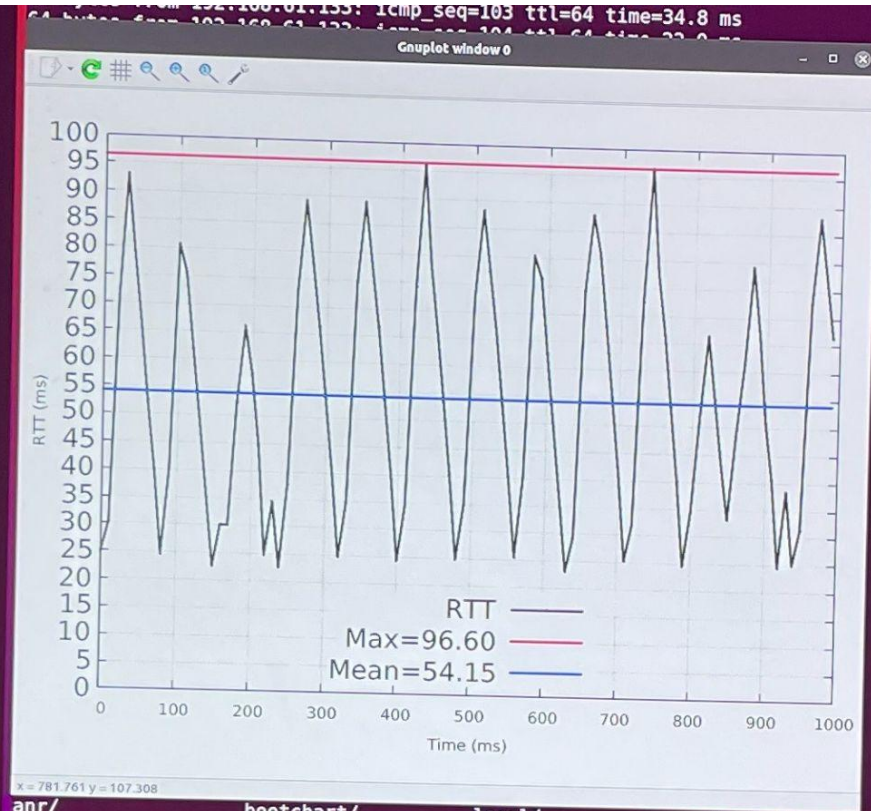
Un problème d'estimation des besoins

63



Occupation du buffer de transmission RLC et valeur rapportée à la station de base via les BSR





anr/ tombstones/ bootchart/ local/ ota_package/ any.pcap001 dalvik-cache/ lost+found/ ping_raw.data

system_de/

64 bytes from 192.168.61.133: icmp_seq=103 ttl=64 time=34.8 ms
 64 bytes from 192.168.61.133: icmp_seq=27 ttl=64 time=26.
 64 bytes from 192.168.61.133: icmp_seq=28 ttl=64 time=21.
 64 bytes from 192.168.61.133: icmp_seq=29
 64 bytes from 192.168.61.133: icmp_seq=63 ttl=64 time=16.6
 64 bytes from 192.168.61.133: icmp_seq=64 ttl=64 time=22.

```

Percent 000000000000f04 <log_measure2>:
log_measure2():
#endif
*/
}

static __inline__ void log_measure2(const char * point, const char *fmt, uint32_t i1, uint32_t i2)
{
0,84  push  %rbp
0,28  mov   %rsp,%rbp
5,57  sub   $0x30,%rsp
1,39  mov   %rdi,-0x18(%rbp)
0,28  mov   %rsi,-0x20(%rbp)
3,90  mov   %edx,-0x24(%rbp)
0,28  mov   %ecx,-0x28(%rbp)
1,11  if (tls_latseq.th_latseq_id == 0) {
0,56  mov   $0xffffffffffffcf0,%rax
movzbl %fs:(%rax),%eax
test  %al,%al
j  jne  32
//is not initialized yet
if (init_thread_for_latseq()) {
- callq init_thread_for_latseq
test  %eax,%eax
j  jne  d6
return;
}
}
latseq_element_t * e = &tls_latseq.log_buffer[tls_latseq.i_write_head*MAX_LOG_SIZE];
4,18 32: mov   $0xffffffffffffcf0,%rax
1,39  mov   %fs:0x3008(%rax),%eax
and   $0x7f,%eax
mov   %eax,%edx
4,18  mov   %rdx,%rax
2,23  add   %rax,%rax
0,84  add   %rdx,%rax
4,18  shl  $0x5,%rax
3,06  mov   %fs:0x0,%rcx
1,39  mov   $0xffffffffffffcf0,%rdx

```

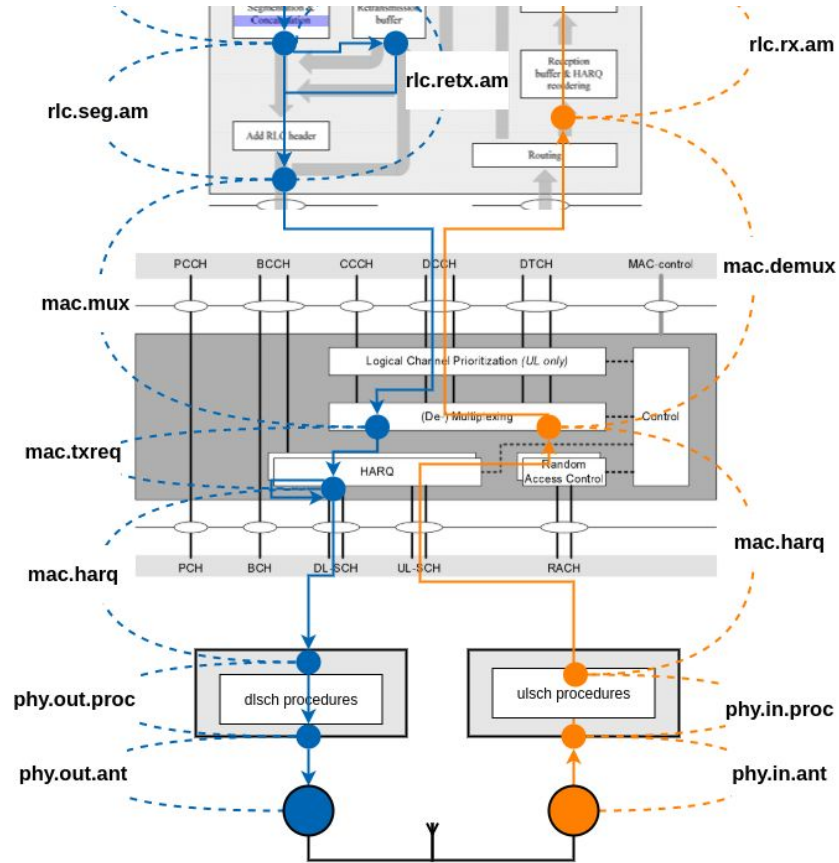
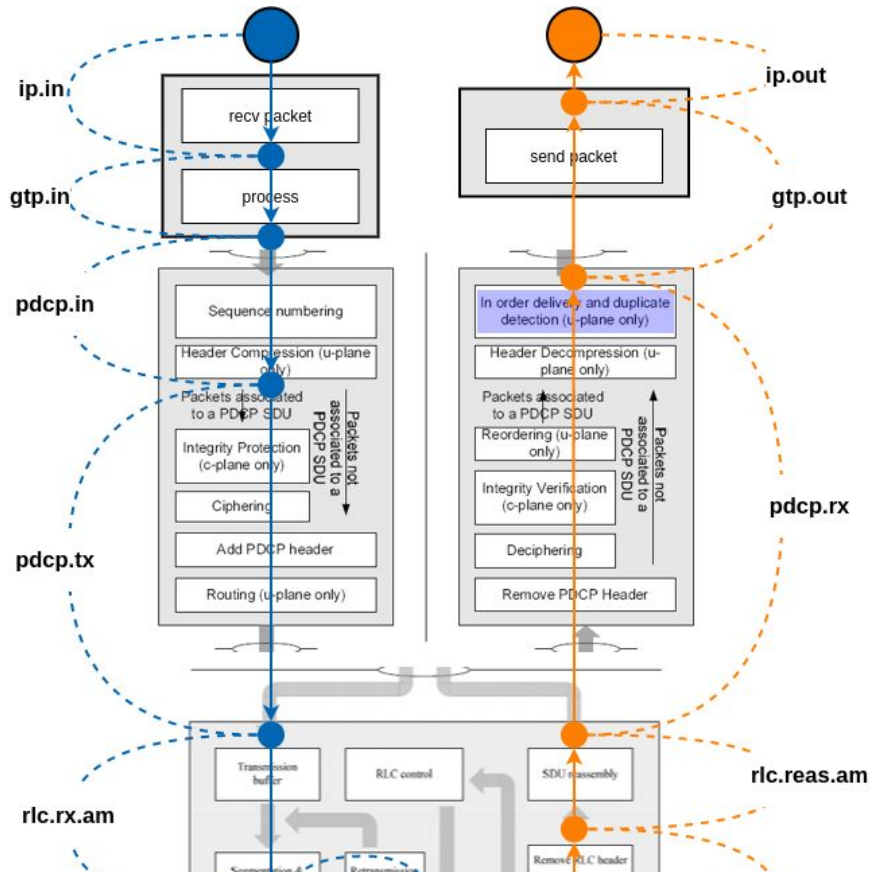
```

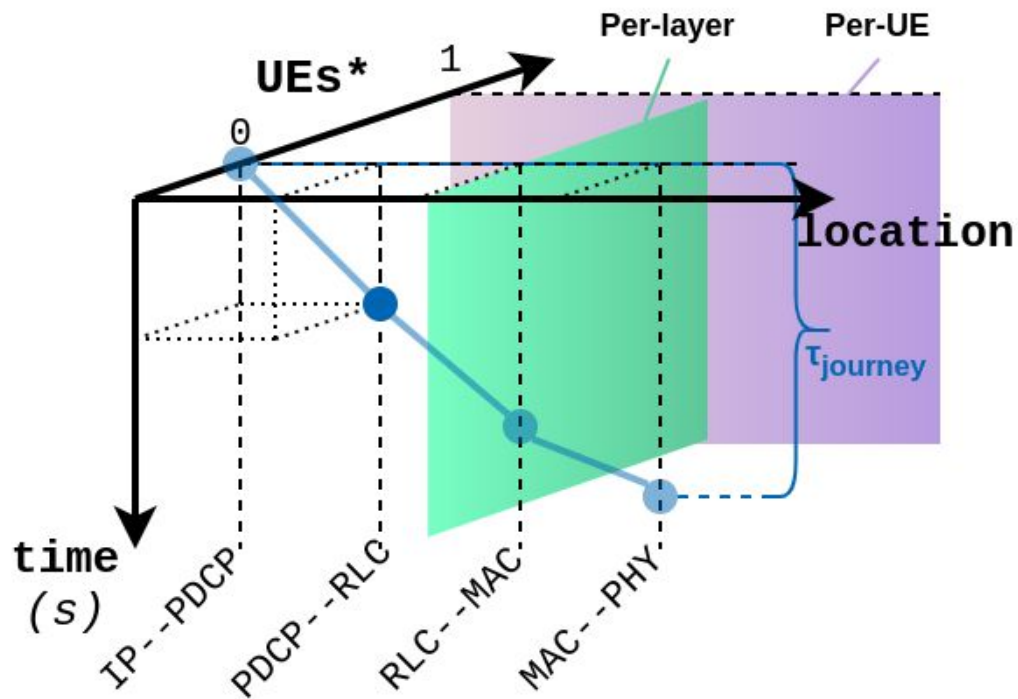
1,39  mov   $0xffffffffffffcf0,%rdx
0,56  add   %rcx,%rdx
3,62  add   %rdx,%rax
4,46  add   $0x8,%rax
2,23  mov   %rax,-0x8(%rbp)
e->ts = rdtsc();
- callq rdtsc
2,51  mov   %rax,%rdx
3,06  mov   -0x8(%rbp),%rax
3,90  mov   %rdx,(%rax)
e->point = point;
mov   -0x8(%rbp),%rax
0,56  mov   -0x18(%rbp),%rdx
1,67  mov   %rdx,0x8(%rax)
e->format = fmt;
mov   -0x8(%rbp),%rax
0,56  mov   -0x20(%rbp),%rdx
5,01  mov   %rdx,0x10(%rax)
e->len_id = 2;
1,39  mov   -0x8(%rbp),%rax
3,90  movw  $0x2,0x18(%rax)
e->data_id[0] = i1;
mov   -0x8(%rbp),%rax
3,90  mov   -0x24(%rbp),%edx
5,01  mov   %edx,0x1c(%rax)
e->data_id[1] = i2;
2,79  mov   -0x8(%rbp),%rax
3,62  mov   -0x28(%rbp),%edx
mov   %edx,0x20(%rax)
tls_latseq.i_write_head++;
1,67  mov   $0xffffffffffffcf0,%rax
1,11  mov   %fs:0x3008(%rax),%eax
lea  0x1(%rax),%edx
2,51  mov   $0xffffffffffffcf0,%rax
3,06  mov   %edx,%fs:0x3008(%rax)
j  jmp  d7
return;
d6:  nop
}
6,13 d7: leaveq
0,56 - retq

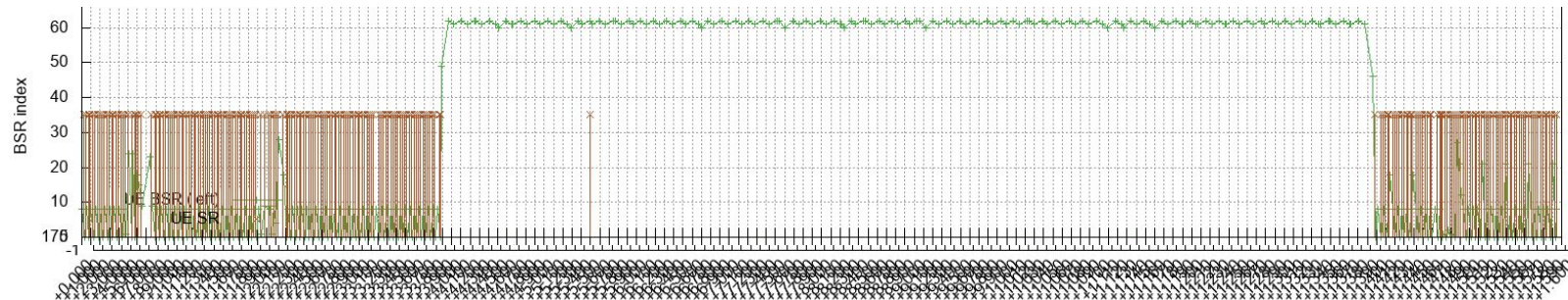
```

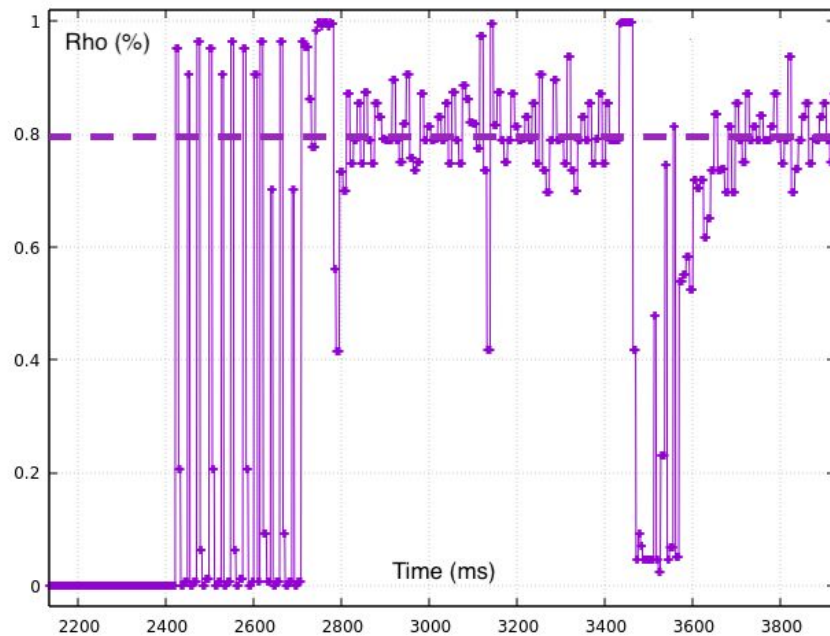
0,23%	UHD for OAI	[kernel.kallsyms]	[k] async_getcompleted
0,22%	UHD for OAI	[kernel.kallsyms]	[k] __schedule
0,22%	MainRu	libusb-1.0.so.0.1.0	[.] libusb_submit_transfer
0,22%	ocp-enb	ocp-enb	[.] latseq_log_to_file
0,22%	UHD for OAI	[kernel.kallsyms]	[k] __pollwait
0,21%	MainRu	[kernel.kallsyms]	[k] _raw_spin_lock
0,21%	MainRu	[kernel.kallsyms]	[k] __slab_alloc
0,20%	MainRu	[kernel.kallsyms]	[k] native_write_msr
0,20%	MainRu	libuhd.so.3.14.1	[.] uhd::transport::vrt::if_hdr_u


```
1612466634.770246 U phy.in.proc--mac.harq.up len565::ue0.cbseg2.fm237.subfm6
1612466634.770247 I mac.harq.up nack0:ue0:harq0.fm237.subfm6
1612466634.770253 I phy.srs ucqi163:ru0.ue0:
1612466634.770254 I mac.ind bsr0.len0:ue0:lcgid0
1612466634.770254 I mac.ind bsr0.len0:ue0:lcgid1
1612466634.770254 I mac.ind bsr0.len0:ue0:lcgid2
1612466634.770254 I mac.ind bsr0.len0:ue0:lcgid3
1612466634.770254 U mac.harq.up--mac.demux len107:rnti22805:ue0.lcid3.fm237.subfm6
1612466634.770255 I rlc.rxbuf.am occ107:rnti22805:drb1
1612466634.770255 U mac.demux--rlc.rx.am len107:rnti22805:drb1.lcid3.rsn36.rso0.rfi2.fm237
1612466634.770255 U rlc.rx.am--rlc.reas.am len107:rnti22805:drb1.rsn36.rso0.rfi2
1612466634.770256 U rlc.reas.am--pdcp.rx len163:rnti22805:drb1.rsn36.rso0.psn0.psn29
1612466634.770260 U pdcp.rx--gtp.out len163:rnti22805:drb1.psn29
1612466634.770265 U gtp.out--ip.out len161:rnti22805:drb1.psn29.teid5.gsn30.ipid0x5a4a
1612466634.770276 I mac.sched.down mcs28.tbs7.nrb3:rnti22805:lcid3
1612466634.770277 D mac.mux--mac.txreq len7:rnti22805:lcid3.txreq0.reqfm238.harq4.sfn3808
1612466634.770279 D mac.txreq--mac.harq.down len7:rnti22805:txreq0.harq4.sfn3808
1612466634.770310 D mac.harq.down--phy.out.proc len7:rnti22805:harq4.fm238.subfm0
1612466634.770370 D phy.out.proc--phy.out.ant len15360::fm238.subfm0
```

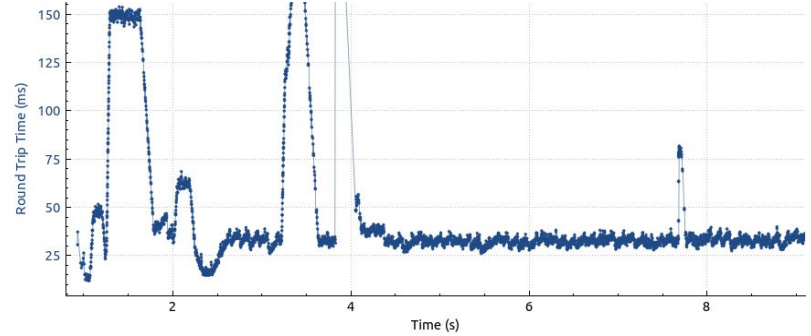
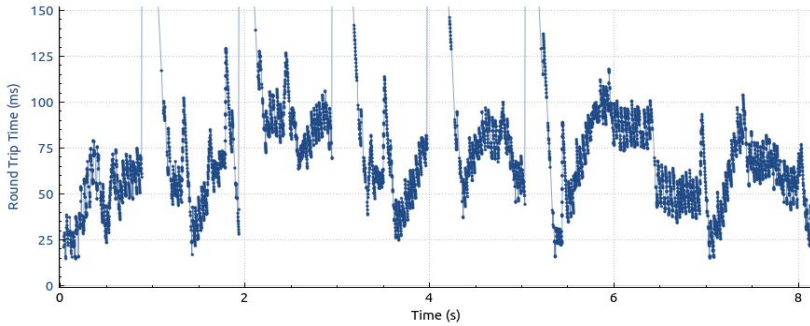




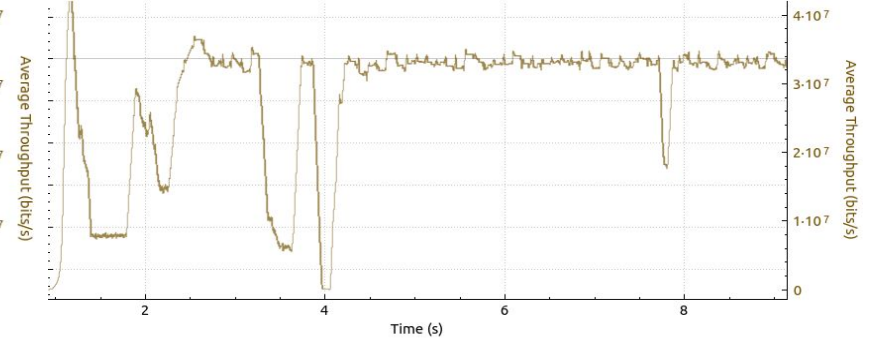
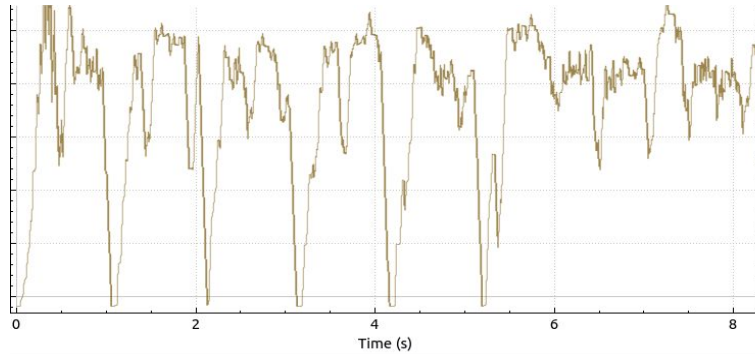


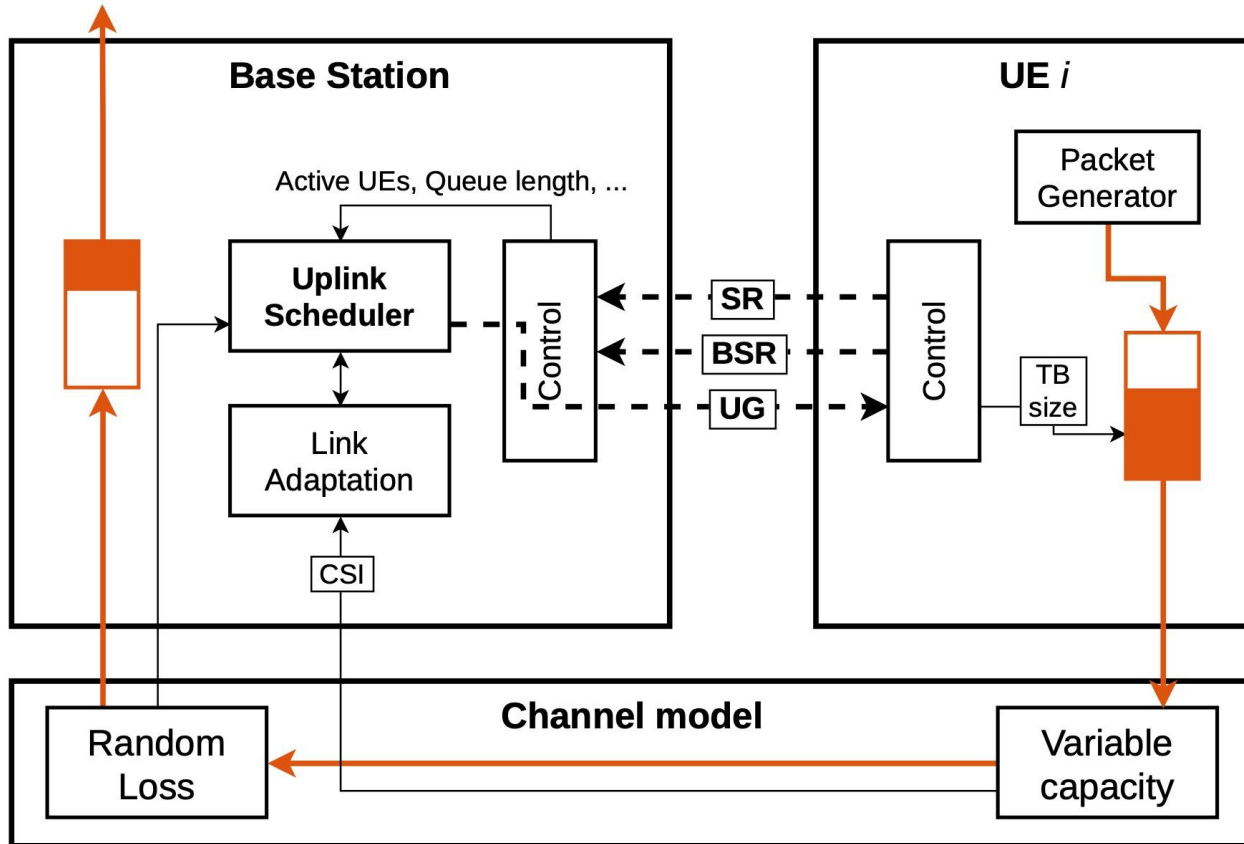


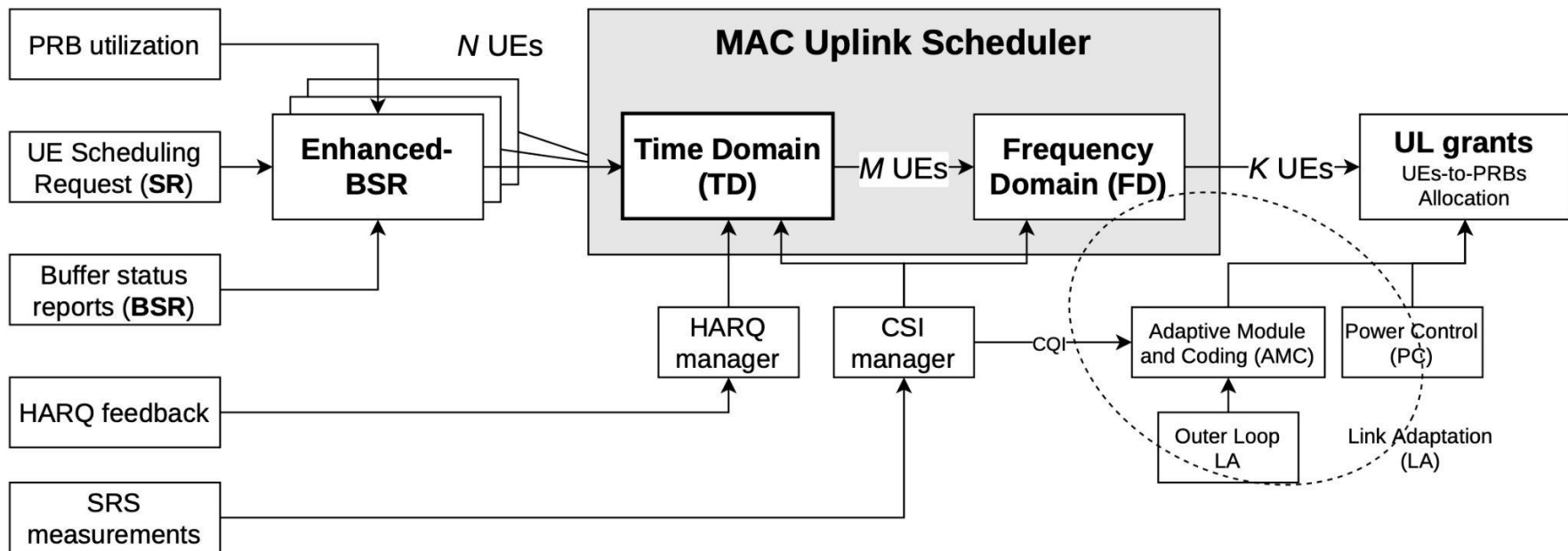
RTT
(ms)



Débit
(bps)







TCP et Enhanced-BSR

Modèle

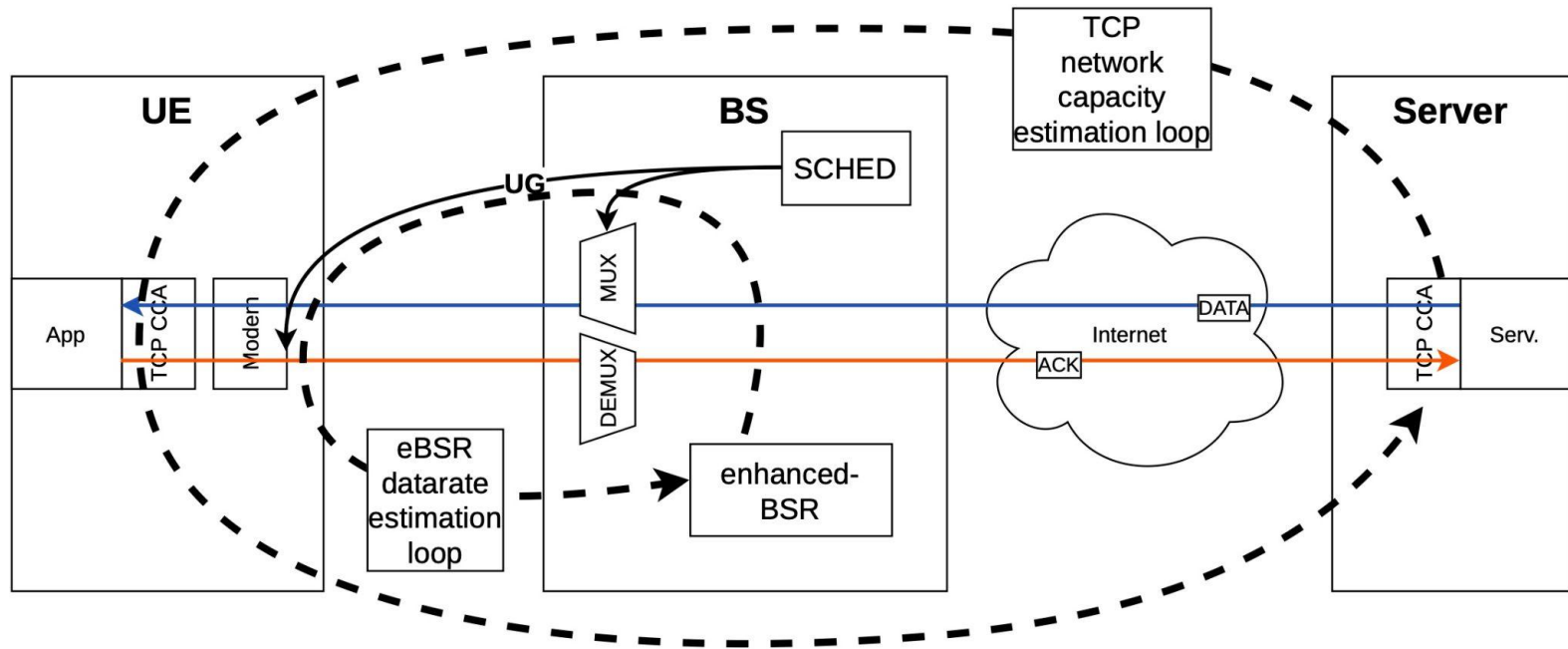


fig : Boucles d'estimation TCP et Enhanced-BSR